



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de Ciclo de Vida
comparativo de pavimentos
en la Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Carlos Enrique Caballero Güereca

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Alexandra Ossa López



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

A

Jacqueline Zamonsett Güereca†

ÍNDICE GENERAL

Glosario y nomenclatura.....	XVII
Resumen	XIX
Abstract	XXI
Auszug	XXIII
Agradecimientos	XXV
Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1 Justificación	2
1.2 Pregunta de investigación	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivo General.....	3
1.4.1 Objetivos específicos.....	3
Capítulo 2 : Marco teórico.....	5
2.1 Ciudad de México.....	5
2.2 Alternativas de rehabilitación	6
2.3 Análisis de Ciclo de Vida	12
2.3.1 Software	15
2.4 Métodos de rehabilitación de carpetas asfálticas en la Ciudad de México.....	19
2.5 Análisis de Ciclo de Vida de métodos de rehabilitación de pavimentos	19
2.5.1 Análisis de costos de ciclo de vida	22
2.6 Análisis de Ciclo de Vida en la Ciudad de México	20
2.7 Análisis de Ciclo de Vida de carpetas asfálticas en la México.....	20
Capítulo 3 : Análisis de Ciclo de Vida Ambiental	24
3.1 Definición de objetivo y alcance del Análisis Ciclo de Vida Ambiental	24
3.1.1 Objetivo.....	24
3.1.2 Función.....	24
3.1.3 Unidad Funcional	24
3.2 Descripción y límites de los sistemas	24
3.2.1 Escenario 0: Fresado parcial y reencarpetado	26
3.2.2 Escenario 1: Fresado total y reencarpetado.....	28

3.2.3 Escenario 2: Reciclaje en frío (Full Depth Reclamation, FDR).....	28
3.2.4 Escenario 3: Reciclaje en caliente (Hot In-place Recycling, HIR)	30
3.2.5 Metodología de evaluación de impacto seleccionada	32
3.2.6 Categorías de impacto seleccionadas	32
3.3 Análisis de Inventario	33
3.3.1 Escenario 0. Fresado parcial y reencarpetado (vida útil: 3 años).....	34
3.3.2 Escenario 1. Fresado total y reencarpetado (vida útil: 15 años).....	39
3.3.3 Escenario 2. Reciclaje en frío (FDR) (vida útil: 20 años).....	44
3.3.4 Escenario 3. Reciclaje en caliente (HIR) (vida útil: 10 años)	51
3.4 Resultados: Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida.	56
3.5 Interpretación y discusión de resultados	58
3.5.1 Cambio climático	59
3.5.2 Acidificación terrestre	63
3.5.3 Formación de oxidantes fotoquímicos	66
3.5.4 Agotamiento de recursos fósiles	69
3.5.5 Toxicidad humana	72
3.5.6 Eutrofización de agua dulce	75
3.5.7 Agotamiento de recursos Hídricos	78
3.6 Análisis de sensibilidad	80
3.6.1 Inclusión de reciclaje parcial en los escenarios.....	82
3.6.2 Disminución de uso de cal en el Escenario 2	84
Capítulo 4 : Análisis de Costo de Ciclo de Vida	86
4.1 Costo inicial	86
4.2 Vida útil estimada	90
4.3 Costos mantenimiento.....	90
4.4 Valor de rescate	91
4.5 Tasa de descuento	91
4.6 Resultados: Evaluación de Costos de Ciclo de Vida	92
4.7 Interpretación	97
Capítulo 5 : Conclusiones	99
5.1 Recomendaciones y futuras líneas de estudio.....	101

Referencias	103
Apéndice 1: Encuesta de evaluación de Softwares de Análisis de Ciclo de Vida	106
Apéndice 2: Ficha técnica de fresadora LXL1000A (Basso, n.d.).....	107
Apéndice 3: Ficha técnica de Petrolizadora Escudero E-20000 (García, 2012)	108
Apéndice 4: Ficha técnica de Finisher CAT AP1000 (Maquinarias-Pesadas, 2010)..	109
Apéndice 5: Ficha técnica de compactador de rodillo liso hamm 3410 (HAMM, n.d.)	110
Apéndice 6: Ficha técnica de compactador de neumáticos Caterpillar PS150C (Caterpillar, 2010)	112
Apéndice 7: Ficha técnica de Spreader SW 18 Sci Streumaster (WIRTGEN Group, 2019).....	116
Apéndice 8: Ficha técnica de WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen (WIRTGEN Group, 2020a).....	119
Apéndice 9: Ficha técnica de Pata de cabra Caterpillar CS/CP44 (Caterpillar, 2009)	123
Apéndice 10: Ficha técnica de Motoconformadora CAT 120 H	128
Apéndice 11: Diagrama de modelación de Escenario base en Umberto	129
Apéndice 12: Diagrama de modelación del Escenario 1 en Umberto.....	130
Apéndice 13: Diagrama de modelación del Escenario 2 en Umberto.....	131
Apéndice 14: Diagrama de modelación del Escenario 3 en Umberto.....	132
Apéndice 15: Diagrama de modelación del Escenario base con reciclaje parcial en Umberto.....	133
Apéndice 16: Diagrama de modelación del Escenario 1 con reciclaje parcial en Umberto	134
Apéndice 17: Diagrama de modelación del Escenario 2 con reciclaje parcial en Umberto	135
Apéndice 18: Diagrama de modelación del Escenario 3 con reciclaje parcial en Umberto	136
Apéndice 19: Diagrama de modelación del Escenario 2 con 2% de cal en Umberto. 137	
Apéndice 20: Diagrama de modelación del Escenario 2 con 0% de cal en Umberto ...	138
Apéndice 21: Resultados por categoría de impacto para el análisis de sensibilidad..	139
Inclusión de reciclaje parcial en los escenarios	139
cambio climático	139

Acidificación terrestre	141
Formación de oxidantes fotoquímicos	142
Agotamiento de recursos fósiles	143
Toxicidad humana	145
Eutrofización de agua dulce	146
Agotamiento de recursos Hídricos	147
Disminución de uso de cal en el Escenario 2.....	149
cambio climático	149
Acidificación terrestre	151
Formación de oxidantes fotoquímicos	153
Agotamiento de recursos fósiles	154
Toxicidad humana	156
Eutrofización de agua dulce	157
Agotamiento de recursos Hídricos	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del marco teórico.	5
Figura 2. Comportamiento de distintos tipos de pavimentos al aplicarles una carga puntual. Fuente: Adaptado de Miranda-Rebolledo, 2010.....	7
Figura 3. Corte transversal de las capas de un sistema carretero.	9
Figura 4. Fisuras, grietas y deterioro superficial común en carpetas asfálticas. Fuente: (Miranda-Rebolledo, 2010).	11
Figura 5. Diagrama mostrando deterioro profundo de la carpeta al final de su etapa de vida útil.	12
Figura 6. Estructura de un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: adaptado de ISO 14040 Fuente: adaptado de (ISO,2006).....	14
Figura 7. Logo de openLCA (GreenDelta, 2020).....	15
Figura 8. Logo de GaBi (thinkstep, 2020).....	16
Figura 9. Logo de Umberto (ifu Hamburg, 2020).	17
Figura 10. Logo de SimaPro (PRé, 2020).	17
Figura 11. Etapas de Ciclo de Vida de los escenarios de tratamientos de rehabilitación de pavimentos.....	25
Figura 12. Profundidad de rehabilitación del Escenario Base.....	26
Figura 13. Fresadora LXL1000A (Basso, s/f).	27
Figura 14. Compactador vibratorio liso Hamm 3410. (HAMM, s/f).	27
Figura 15. Compactador de neumáticos caterpillar PS150C (Caterpillar, 2010).	27
Figura 16. Petrolizadora Escudero E-20000 (García, 2012).	27
Figura 17. Finisher CAT AP1000. (CAT,s/f).....	27
Figura 18. Profundidad de rehabilitación del Escenario 1.....	28
Figura 19. Profundidad de rehabilitación del Escenario 2.....	29
Figura 20. Pata de cabra Caterpillar CS/CP44. (Caterpillar, 2009).....	30
Figura 21. Motoconformadora Caterpillar 120H. (MercadoLibre, 2020).	30
Figura 22. Spreader SW 18 Sci, marca Streumaster. (Wirtgen Group, 2019).....	30

Figura 23. WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen. (Wirtgen Group, 2020).....	30
Figura 24. Calentador autopulsado HM 4500 marca WIRTGEN. (WIRTGEN Group, 2020).....	31
Figura 25. Flujo en el método "Remix Plus" de carpeta asfáltica dentro del reciclador en caliente Remixer 4500 marca WIRTGEN. (WIRTGEN Group, 2020).	31
Figura 26. Profundidad de rehabilitación del Escenario 3.....	32
Figura 27. Impacto ambiental total normalizado por escenario y por categoría de impacto.	57
Figura 28. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático. 59	
Figura 29. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.	63
Figura 30. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.	66
Figura 31. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.	69
Figura 32. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana..	72
Figura 33. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce.....	75
Figura 34. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos.....	78
Figura 35. Impacto ambiental total normalizado de todos los escenarios y análisis de sensibilidad por categoría de impacto.	82
Figura 36. Normalización de escenarios y análisis de sensibilidad por reciclaje parcial.	83
Figura 37. Normalización de escenarios y análisis de sensibilidad por uso de cal.	85
Figura 38. Representación gráfica del método de Análisis de Costos de Ciclo de Vida por medio de VPN (APA,2011).....	86
Figura 39. Cálculo de la tasa de descuento a partir de la tasa de inflación y la tasa de interés de los últimos 20 años.	92
Figura 40. Suavización de la curva con media móvil a dos años.	92
Figura 41. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN general.	95

Figura 42. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario Base: fresado parcial y reencarpetao.....	95
Figura 43. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario 1: fresado total y reencarpetao.....	96
Figura 44. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario 2: reciclaje en frío (FDR).	96
Figura 45. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario 3: reciclaje en caliente (HIR).....	96
Figura 46. Inversión monetaria acumulada a VPN para el Ciclo de Vida de los cuatro escenarios en el período de Estudio de 30 años, en MX\$.	97
Figura 47. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático.....	139
Figura 48. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.....	141
Figura 49. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.....	142
Figura 50. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.	143
Figura 51. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.	145
Figura 52. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce.	146
Figura 53. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos.	147
Figura 54. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático.....	149
Figura 55. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.....	151
Figura 56. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.....	153

Figura 57. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.	154
Figura 58. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.....	156
Figura 59. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce.	157
Figura 60. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos.	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Evaluación de características de openLCA. Fuente: Encuesta realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera	16
Tabla 2: Evaluación de características de GaBi. Fuente: Encuesta propia realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera	16
Tabla 3: Evaluación de características de Umberto LCA+. Fuente: Encuesta propia realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera	17
Tabla 4: Evaluación de características de SimaPro. Fuente: Encuesta propia realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera	18
Tabla 5: Promedio aritmético de calificaciones de los Softwares.	18
Tabla 6. Categorías de impacto seleccionadas.	33
Tabla 7. Inventario de entradas de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao.....	34
Tabla 8. Inventario de salidas de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao	36
Tabla 9. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao	37
Tabla 10. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao	38
Tabla 11. Inventario de entradas de Escenario 1: fresado total y reencarpetao.....	39
Tabla 12. Inventario de salidas de Escenario 1: fresado total y reencarpetao	41
Tabla 13. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 1: fresado total y reencarpetao	41
Tabla 14. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 1: fresado total y reencarpetao	43
Tabla 15. Inventario de entradas de Escenario 2: reciclaje en frío.....	44
Tabla 16. Inventario de salidas de Escenario 2: reciclaje en frío	47
Tabla 17. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 2: reciclaje en frío	48
Tabla 18. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 2: reciclaje en frío	50

Tabla 19. Inventario de entradas de Escenario 3: reciclaje en caliente	51
Tabla 20. Inventario de salidas de Escenario 3: reciclaje en caliente.....	53
Tabla 21. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 3: reciclaje en caliente.....	54
Tabla 22. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 3: reciclaje en caliente.....	55
Tabla 23. impacto ambiental total por escenario y por categoría de impacto.	56
Tabla 24. Decrementos porcentuales de los impactos ambientales por categoría de impacto con respecto al Escenario Base.....	57
Tabla 25. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático, en kg CO ₂ eq.....	59
Tabla 26. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Climático.....	60
Tabla 27. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre, en kg SO ₂ eq.....	63
Tabla 28. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre	64
Tabla 29. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en kg NMVOC eq.....	66
Tabla 30. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos	67
Tabla 31. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles, en kg Petróleo eq.....	69
Tabla 32. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.....	70
Tabla 33. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana, en kg 1.4-DCB eq.	72
Tabla 34. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.....	73

Tabla 35. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, en kg P eq.....	75
Tabla 36. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce.....	76
Tabla 37. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos, en m ³	78
Tabla 38. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos	79
Tabla 39. Decrementos porcentuales de escenarios por categoría de impacto para análisis de sensibilidad por reciclaje parcial	83
Tabla 40. Decrementos porcentuales promedio de escenarios por Etapa de Ciclo de Vida impacto para análisis de sensibilidad por reciclaje parcial.....	84
Tabla 41. Decrementos porcentuales de escenarios por categoría de impacto para análisis de sensibilidad por uso de cal.....	85
Tabla 42. Decrementos porcentuales promedio de escenarios por Etapa de Ciclo de Vida impacto para análisis de sensibilidad por uso de cal	85
Tabla 43. Costos por rehabilitación del Escenario 0: Fresado parcial y reencarpetao.	87
Tabla 44. Costos por rehabilitación de Escenario 1: Fresado total y reencarpetao.	88
Tabla 45. Costos por rehabilitación de Escenario 2: Reciclaje en frío.....	88
Tabla 46. Costos por rehabilitación de Escenario 3: Reciclaje en caliente.	89
Tabla 47. Resumen de datos para la utilización del método de Valor Presente Neto (VPN)	92
Tabla 48. Ubicación temporal de costos a VPN.....	93
Tabla 49: Matriz de respuesta de encuesta del Dr. Alejandro Padilla Rivera	106
Tabla 50. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático, en kg CO ₂ eq.	139
Tabla 51. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático	140
Tabla 52. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre, en kg SO ₂ eq.	141

Tabla 53. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.....	141
Tabla 54. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en kg NMVOC eq.	142
Tabla 55. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos	143
Tabla 56. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles, en kg Petróleo eq.	144
Tabla 57. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles ..	144
Tabla 58. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana, en kg 1.4-DCB eq.....	145
Tabla 59. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana	145
Tabla 60. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, en kg P eq.....	146
Tabla 61. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce	147
Tabla 62. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos, en m ³	148
Tabla 63. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos	148
Tabla 64. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático, en kg CO ₂ eq.	149
Tabla 65. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático.....	150
Tabla 66. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre, en kg SO ₂ eq.	151

Tabla 67. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre	152
Tabla 68. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en kg NMVOC eq.	153
Tabla 69. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos	153
Tabla 70. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles, en kg Petróleo eq.....	154
Tabla 71. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.....	155
Tabla 72. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana, en 1.4-DCB eq.	156
Tabla 73. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.....	156
Tabla 74. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, en kg P eq.....	157
Tabla 75. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce	158
Tabla 76. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos, en m ³	159
Tabla 77. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos	159

GLOSARIO Y NOMENCLATURA

Español	English	Deutsch
CDMX: Ciudad de México	CDMX: Mexico City	CDMX: Mexiko-Stadt
ZMCM: Zona Metropolitana de la Ciudad de México	MZMC: Metropolitan Zone of Mexico City	MRMS: Metropolregion von Mexiko-Stadt
MRCO: Materiales reciclados, coproductos y de desecho	RCWM: Recycled, co-product, and waste materials	RNAM: Recycling-, Nebenprodukt- und Abfallmaterialien
PAR: Pavimento de asfalto recuperado/reciclado	RAP: Reclaimed/recycled asphalt pavement	WAB: Wiedergewonnener Asphaltbelag
TAR: Tejas de asfalto reciclado	RAS: Recycled asphalt shingles	RAS: Recyclerte Asphaltschindeln
MAF: Mezcla asfáltica en frío	CMA: cold-mix asphalt	KMA: Kaltmischasphalt
MAC: Mezcla Asfáltica en Caliente	HMA: hot-mix asphalt	HMA: Heißmisch Asphalt
MAT: Mezcla Asfáltica Tibia	WMA: warm-mix asphalt	WMA: Warmmischasphalt
ACV: Análisis de Ciclo de Vida	LCA: Lifecycle Assessment	LZA: Lebenszyklusanalyse
ACCV: Análisis de Costos de Ciclo de Vida	LCCA: Lifecycle Cost Analysis	LZKA: Lebenszykluskostenanalyse
FHWA: Administración Federal de Carreteras (EE. UU.)	FHWA: Federal Highway Administration (USA)	FHWA: Bundesstraßenverwaltung (USA)
APA: Alianza de Pavimentos Asfálticos	APA: Asphalt Pavement Alliance	APA: Asphaltdecke Allianz
VUR: Vida Útil Remanente	RSL: Remaining Service Life	VLD: verbleibende Lebensdauer
PaLATE: Herramienta de evaluación del ciclo de vida del pavimento para efectos ambientales y económicos	PaLATE: Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects.	PaLATE: Werkzeug zur Bewertung des Lebenszyklus von Straßenbelägen für ökologische und ökonomische Auswirkungen
CO ₂ : Dióxido de carbono	CO ₂ : Carbon dioxide	CO ₂ : Kohlenstoffdioxid
NO _x : Óxidos de nitrógeno	NO _x : Nitrogen oxides	NO _x : Stickstoffoxide

PM ₁₀ : Partículas suspendidas	PM ₁₀ : Particulate Matter	PM ₁₀ : Feinstaub
SO ₂ : Dióxido de azufre	SO ₂ : Sulfur dioxide	SO ₂ : Schwefeldioxid
CO: Monóxido de carbono	CO: Carbon monoxide	CO: Kohlenstoffmonoxid
ISO: Organización Internacional de Estandarización	ISO: International Organization for Standardization	ISO: Internationale Standardisierungsorganisation
tkm: tonelada-kilómetro	tkm: metric ton-kilometer	tkm: Tonne-Kilometer

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de tesis es cuantificar y analizar los impactos ambientales de tres distintos métodos de tratamientos de rehabilitación de carpetas asfálticas propuestos para las vialidades de la red primaria de la Ciudad de México (CDMX) y compararlos con el procedimiento actual para determinar la factibilidad de la introducción de alternativas distintas de rehabilitación con base en un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), basado en las Normas ISO 14040 y 14044. El cumplimiento de este objetivo busca el mejoramiento en la eficiencia y el desempeño ambiental de los procesos de obras en la CDMX, trabajando así, hacia los objetivos de desarrollo sostenible planteados por Naciones Unidas y favoreciendo la economía circular.

Cada uno de los cuatro distintos métodos de rehabilitación analizados en este documento se denominan escenarios. El Escenario Base (cero) representa la forma actual de rehabilitación de carpetas en la CDMX: un fresado parcial de la carpeta asfáltica y reencarpetao de siete centímetros de profundidad, mientras que los otros tres escenarios plantean métodos alternos como propuestas para la sustitución del proceso actual. Estos tres escenarios propuestos se describen a continuación. Escenario 1: fresado total de la carpeta asfáltica y su remplazo, considerando un espesor de quince centímetros como representativo de las vialidades de la red primaria de la CDMX. Escenario 2: un reciclado en frío (Full Depth Reclamation) y Escenario 3: un reciclado en caliente (Hot In-place Recycling) y reemplazo de la capa superior de la carpeta asfáltica por medio de paneles de calentamiento por quema de gas propano. La Unidad Funcional se define como la rehabilitación de la carpeta asfáltica de 1 km-carril de vialidad principal de la Ciudad de México con 3.5 metros de ancho, sin curvas, salidas o incorporaciones y durante un período de estudio de 30 años. El alcance de los sistemas toma en cuenta todo el Ciclo de Vida de la rehabilitación de la carpeta: desde la primera extracción de materias primas, hasta la última remoción y disposición final del material residual de la carpeta 30 años después, tomando como punto de partida para todos los escenarios la existencia previa de una vialidad con daños en toda la profundidad de la carpeta asfáltica.

De los cuatro sistemas evaluados se observó que el Escenario Base obtuvo el peor desempeño ambiental para todas las categorías de impacto evaluadas, debido principalmente a su corta vida útil, como consecuencia de las grietas profundas que persisten debajo de la carpeta asfáltica cuando se realiza el fresado parcial. El escenario con los menores impactos ambientales resulta ser el Escenario 3, reciclaje en caliente, gracias a la maquinaria de alta especialización que es capaz de unificar varias labores en un solo equipo. Adicionalmente,

se realizan dos análisis de sensibilidad para evaluar los cambios que presentan los cuatro escenarios, el primero considerando un reciclaje parcial de la capa asfáltica fresada y el segundo para evaluar el impacto ambiental en el Escenario 2: reciclaje en frío al modificar la dosificación de cal empleada en dicho escenario. De estos análisis de sensibilidad se concluye que el reciclaje parcial mejora de manera significativa el desempeño ambiental del Escenario Base, y en menor cantidad a los otros tres escenarios evaluados. Por otra parte, se observó que la dosificación de la cal genera un impacto significativo en el desempeño ambiental del Escenario 2, sin la cual su impacto a la categoría de cambio climático disminuye aproximadamente a la mitad. Finalmente, se realizó un análisis económico de las distintas alternativas, evaluados por medio de la metodología del Análisis de Costos de Ciclo de Vida, usando el procedimiento propuesto por la Alianza de Pavimento Asfáltico de los Estados Unidos, con el cual se concluye que el escenario con los mayores costos a largo plazo es el Escenario Base, pero es preferido por las autoridades de la CDMX por tener bajos costos a corto plazo (menor a 6 años).

ABSTRACT

The objective of this thesis is to quantify and analyze the environmental impacts of three different rehabilitation methods proposed for the roads of Mexico City's (CDMX) primary network and compare them with the current procedure for determining the feasibility of introducing different rehabilitation alternatives based on a Life Cycle Assessment (LCA) approach, based on the ISO 14040 and 14044 methodologies. This objective seeks to improve the efficiency and environmental performance of construction processes in Mexico City, thus working towards the sustainable development objectives set by the United Nations and promoting the circular economy.

Each of the four different rehabilitation methods discussed in this document are called scenarios. The Base Scenario (zero) represents the current form of pavement preservation in Mexico City: partial milling (seven centimeters deep) and replacement of the surface course, while the other three scenarios propose alternative methods for replacing the current process. These three proposed scenarios consist of the following: Scenario 1: total milling and replacement of the surface course, considering a thickness of 15 centimeters as a representative thickness of the roads of the primary network of the CDMX. Scenario 2: Cold recycling (Full Depth Recycling) and Scenario 3: Hot in-place recycling and replacement of the surface course by means of heating panels by burning propane gas. The Functional Unit is defined as the conservation of the surface course of 1 km-lane of main road in Mexico City with 3.5 meters wide, without curves, exits or incorporations and during a study period of 30 years. The scope of the systems considers the entire Life Cycle of the rehabilitation of the surface course: from the first extraction of raw materials to the last removal and final disposal of the residual material 30 years later, taking as a starting point for all scenarios the previous existence of a road with damage to the entire depth of the surface course.

Of the four systems evaluated, it was observed that the Base Scenario achieved the worst environmental performance for all impact categories evaluated, mainly due to its short service life, because of the deep cracks that persist under the surface course when partial milling is performed. The scenario with the lowest environmental impacts turns out to be Scenario 3, Hot In-place Recycling, thanks to the highly specialized machinery that can unify several tasks into a single equipment. In addition, two sensitivity analyses are performed to evaluate the changes presented by the four scenarios, the first considering a partial recycling of the milled asphalt and the second to assess the environmental impact on the climate change impact category of Scenario 2: cold recycling, modifying the dosage of the quicklime used. These sensitivity analyses conclude that partial recycling significantly improves the

environmental performance of the Base Scenario, and in less quantity to the other three scenarios evaluated. On the other hand, it was observed that the dosage of lime has a significant impact on the environmental performance of Scenario 2, without which its impact on the climate change category is cut in half. Finally, an economic analysis of the various alternatives was carried out, evaluated using the Life Cycle Cost Analysis methodology, using the procedure proposed by the United States Asphalt Pavement Association, which concludes that the scenario with the highest long-term costs is the Base Scenario, but is preferred by authorities since it has low short-term costs (less than 6 years).

AUSZUG

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Umweltauswirkungen von drei verschiedenen Methoden der Asphaltkonservierung für die Straßen des Primärnetzes von Mexiko-Stadt (CDMX) zu quantifizieren und zu analysieren, dann sie mit dem derzeitigen Verfahren zur Bestimmung der Durchführbarkeit der Einführung verschiedener Rehabilitationsalternativen auf der Grundlage einer Lebenszyklus-Analyse (LZA) zu vergleichen, die auf den Methoden ISO 14040 und 14044 basiert ist. Das zielt darauf ab, die Effizienz und die Umweltleistung der Bauprozesse in Mexiko-Stadt zu verbessern und so auf die von den Vereinten Nationen festgelegten Ziele der nachhaltigen Entwicklung hinzuwirken und die Kreislaufwirtschaft zu fördern.

Jede der vier verschiedenen Rehabilitationsmethoden, die in diesem Dokument behandelt werden, werden als Szenarien bezeichnet. Das Basisszenario (Null) stellt die aktuelle Form der Asphaltkonservierung in Mexiko-Stadt dar: Teilfräsen (sieben Zentimeter tief) und Ersatz des Asphalts, während die anderen drei Szenarien alternative Methodenvorschläge, um den aktuellen Prozess zu ersetzen. Diese drei vorgeschlagenen Szenarien bestehen aus folgenden: Szenario 1: Gesamtfräsen und Austausch des Asphalts, wobei eine Dicke von 15 Zentimetern als repräsentative Dicke der Straßen des primären Netzes des CDMX berücksichtigt wird. Szenario 2: Kaltrecycling (Full Depth Recycling) und Szenario 3: Warmes In-Place-Recycling und Austausch des Asphalts durch Heizplatten durch Verbrennung von Propangas. Die funktionale Einheit ist definiert als die Erhaltung des Oberflächenverlaufs von 1 km-Fahrspur der Hauptstraße in Mexiko-Stadt mit 3,5 Metern Breite, ohne Kurven, Ausfahrten oder Eingemeindungen und während eines Studienzeitraums von 30 Jahren. Der Umfang der Systeme berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus der Sanierung des Asphalts: von der ersten Gewinnung der Rohstoffe bis zur letzten Entnahme und Endlagerung des Restmaterials 30 Jahre später, wobei als Ausgangspunkt für alle Szenarien das frühere Bestehen einer Straße mit Schäden an der gesamten Tiefe des Asphalts (15 Zentimetern) ist.

Von den vier untersuchten Systemen wurde beobachtet, dass das Basisszenario die schlechteste Umweltleistung für alle bewerteten Aufprallkategorien erreichte, vor allem aufgrund seiner kurzen Lebensdauer, als Folge der tiefen Risse, die unter dem Asphalt bestehen, wenn Teilfräsen durchgeführt werden. Das Szenario mit den geringsten Umweltauswirkungen entpuppt sich als Szenario 3, Hot In-Place Recycling, dank der hochspezialisierten Maschinen, die in der Lage sind, mehrere Aufgaben in einer einzigen Maschine zu vereinheitlichen. Darüber hinaus werden zwei Sensitivitätsanalysen

durchgeführt, um die Veränderungen der vier Szenarien zu bewerten, wobei das erste eine teilweise Wiederverwertung des gemahlten Asphalts und das zweite die Umweltauswirkungen auf die Kategorie der Auswirkungen auf den Klimawandel in Szenario 2: Kaltrecycling bewertet, dass durch die Änderung der Dosierung des verwendeten Kalks durchgeführt wird. Diese Sensitivitätsanalysen kommen zu dem Schluss, dass das partielle Recycling die Umweltleistung des Basisszenarios erheblich verbessert und in geringerer Menge auf die anderen drei bewerteten Szenarien zurückgeht. Auf der anderen Seite wurde beobachtet, dass die Dosierung von Kalk einen signifikanten Einfluss auf die Umweltleistung von Szenario 2 hat, ohne die seine Auswirkungen auf die Kategorie Klimawandel halbiert werden. Schließlich wurde eine wirtschaftliche Analyse der verschiedenen Alternativen durchgeführt, die nach der Methode der Lebenszykluskostenanalyse anhand des von der amerikanischen Asphalt Pavement Assoziation vorgeschlagenen Verfahrens bewertet wurde, das zu dem Schluss kommt, dass das Szenario mit den höchsten langfristigen Kosten das Basisszenario ist, aber von den Behörden bevorzugt wird, da es niedrige kurzfristige (weniger als 6 Jahre) Kosten hat.

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Noé Hernández Fernández** por su invaluable apoyo, dirección y motivación a lo largo del desarrollo de esta tesis.

A la **Dra. Alexandra Ossa López** por su apoyo invaluable y confianza necesarios para la elaboración de esta tesis.

A los Maestros en Ingeniería **Alba Beatriz Vázquez González, Marco Tulio Mendoza Rosas, Carlos Narcia Morales y Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose** por su apoyo y enseñanzas durante toda la carrera, los cuales han hecho posible el desarrollo académico de un servidor.

Al **Instituto de Ingeniería** por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

Al grupo de investigación de **Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad (CiViCCS)** por brindarme el equipo y software necesarios para realizar los estudios.

A la **Facultad de Ingeniería (FI)**, a la **Dirección General de Cooperación e Internacionalización (DGEI)** y a la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por brindarme educación de alta calidad a nivel internacional, así como las becas de métodos de investigación y movilidad estudiantil.

Al **Ing. Carlos Slim** por el apoyo económico recibido a través de la beca otorgada por la Fundación Telmex Telcel

Al **Colegio Alemán Alexander von Humboldt**, cuya educación de primera es comparable al nivel universitario, por brindarme las herramientas necesarias para tener una perspectiva multicultural.

A **Moisés Mendoza, Paty Gutiérrez, Pedro Ruiz, Jesús Orozco** y a todo el equipo de trabajo de Cogutsa por brindarme oportunidades, experiencia y ética laboral.

A **Rubén Ortiz†** y **Polo Ulises†** por su amistad y apoyo en momentos difíciles y cuyas amistades jamás serán olvidadas.

A **Jaqueline Zamonsett Güereca†** por el enfoque y la inspiración que sigue brindando.

A mis incondicionales amigos **Esteban Rangel, Juan Pablo Ramírez, Pablo Gaviño y Sebastián Mokross** por su apoyo e interés en el desarrollo de esta tesis.

A **Sandra Giovanna Larrauri**, por ser mi mano derecha y apoyarme en los momentos más difíciles y frustrantes.

A mi hermana, **Constanza Eleonor** por su cariño, paciencia y compañía en todos momentos.

A mis padres, **Carlos Antonio** y **Leonor Patricia** por haber sido amorosos, diligentes y ejemplos a seguir, permitiendo con ello la escritura de esta tesis.

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México (CDMX) y 27 municipios del Estado de México (Edo. Mex.), conocidos en conjunto como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM); con más de 21.8 millones de habitantes, son áreas de gran importancia económica, política, comercial y cultural para México por las distintas actividades que diariamente se realizan en la región y es uno de los cinco centros urbanos más poblados del mundo (United Nations, 2018). La ZMCM ha mostrado un incremento del parque vehicular en las últimas décadas, afectando de manera considerable los tiempos de traslado y; consecuentemente, las emisiones a la atmósfera, que causan graves problemas en la calidad del aire. A nivel nacional, el número total de vehículos de motor registrados en circulación creció de 15.6 millones de unidades en 2000 a más de 38 millones de unidades para 2014, lo que significa un aumento de casi 250%. De los 38 millones de vehículos motorizados, el 13.6% y el 12.5% les pertenecen al Edo. Mex. y a la CDMX, respectivamente. Por lo tanto, casi 10 millones de unidades motorizadas circulan en la ZMCM (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2016). Para 2018, fueron alrededor de 12.5 millones de unidades según bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

2016 fue el primer año en una década, en el cual la concentración de O₃ en el aire de la ZMCM requirió la activación del Plan de Contingencia Ambiental Atmosférica (PCAA) de la SEMARNAT, y después de ese año, entre los meses de marzo y mayo, cada año ha presentado mínimo una “temporada de ozono” en la cual se ha tenido que poner en marcha el PCAA, incluido el año de 2020, en el cual a pesar de la pandemia por COVID-19 y la disminución en la circulación de vehículos, la concentración media diaria de ozono en la capital y área metropolitana no mostró disminución distinguible comparada con años anteriores (Peralta et al., 2021). Es por esta razón que se debe procurar un futuro en el cual los impactos ambientales causados por actividades indispensables en la ZMCM sean mínimos. Actualmente, las vialidades primarias de la CDMX son rehabilitadas en promedio cada tres años, esto debido a la presencia de fallas y circunstancias que afectan el tránsito seguro de vehículos, cada tratamiento de rehabilitación realizado genera considerables emisiones e impactos ambientales, por lo que, es primordial mejorar el desempeño de los materiales y procedimientos utilizados y así, buscar una mejora de las condiciones ambientales de la ZMCM

Al diseñar, manufacturar, promocionar, utilizar y desechar algún producto, es inevitable el uso de múltiples materias primas, energía, transporte y tipos de disposición. Por lo que, una evaluación exhaustiva de los aspectos integrales de este producto, se vuelve un proceso

complicado y complejo (Jelse, Eriksson, and Einarson, 2009). El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite cuantificar de manera sistemática los impactos al ambiente ocasionados por un producto o servicio a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida; desde la extracción de las materias primas, hasta su disposición final. Es por esta razón que el ACV, basado en las series de normas ISO 14040 e ISO 14044, publicadas por la Organización Internacional de Estandarización, será el enfoque principal de este trabajo.

1.1 Justificación

La CDMX se ubica en una cuenca semicerrada rodeada de montañas con una altitud promedio de 2240 msnm y presenta radiación solar constante en el transcurso del año; factores que, en conjunto con el constante crecimiento poblacional, la expansión sin control de la mancha urbana, la alta tasa de motorización, el aumento en la industrialización y la quema de combustibles fósiles llegan a ser causa de graves problemas de calidad del aire (Molina, De Foy, Vázquez Martínez, Hugo, and Figueroa, 2009).

Por esta razón, y para trabajar en dirección del cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas: número tres (Salud y bienestar), número once (Ciudades y comunidades sostenibles), número doce (Producción y consumo sustentables), número trece (Acción por el clima) y número diecisiete (Avanzar para lograr los objetivos); es necesaria la investigación, elaboración e implementación de planes de acción para poder tomar las decisiones correctas e informadas en aspectos ambientales y de economía circular. Esta tesis tiene como propósito generar la información necesaria para que los tomadores de decisiones tengan bases bien cimentadas en metodologías adoptadas y estandarizadas a nivel mundial (ACV y ACCV) para implementar medidas sostenibles dentro de la infraestructura de carreteras urbanas y pavimentos de la CDMX.

En este documento se realiza un ACV basado en las normas ISO 14040 e ISO 14044, comparando las técnicas y métodos de rehabilitación llevados a cabo actualmente en la CDMX con propuestas que buscan un mejor desempeño tanto técnico como ambiental y una extensión de la vida útil de las carpetas asfálticas de la Ciudad de México (lo cual no ha sido realizado hasta el momento); mitigando así, de forma significativa los impactos ambientales generados por los procesos de rehabilitación. La presentación de resultados se llevará a cabo con un enfoque de toma de decisiones, para propiciar la revisión y posible implementación por parte de entidades gubernamentales o privadas de esta ciudad, quienes pueden encontrar una mejora a sus procesos de mantenimiento y rehabilitación en esta tesis.

Este análisis se lleva a cabo con la asesoría de grupos multidisciplinarios de investigación del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), los cuales tienen gran experiencia en los temas a tratar, como son: el Grupo de Ciclo de Vida, cambio climático y Sostenibilidad (CIVICCS), creado en 2010; el Laboratorio de Vías Terrestres (LVT), el cual inició operaciones en 1971 y el Consorcio del Análisis de Ciclo de Vida de la Infraestructura del Transporte (CAIT), creado en 2019 para el congreso Life Cycle Assessment 2020 (N. Hernandez-Fernandez, L.P. Güereca-Hernandez, A. Ossa-Lopez, 2019).

1.2 Pregunta de investigación

Si se compara la práctica actual del proceso de rehabilitación de las vialidades de la red primaria en la CDMX con propuestas alternas con un enfoque de mitigación de impactos ambientales debidos a emisiones generadas por los procesos de rehabilitación. ¿En qué manera y en qué grado pueden los sistemas alternos de rehabilitación generar menores impactos ambientales?

1.3 Hipótesis

Se prevé que el uso de nuevos sistemas de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras de pavimento permitan disminuir de manera significativa los impactos ambientales y mejorar los desempeños económicos a largo plazo.

1.4 Objetivo General

Evaluar los impactos ambientales y económicos de tres métodos de rehabilitación de carpetas asfálticas para las vialidades de la red primaria de la CDMX y compararlos con la práctica actual considerando un período de 30 años de servicio y bajo el enfoque de Análisis de Ciclo Vida.

1.4.1 Objetivos específicos

- Definir objetivos y alcances del ACV
- Desarrollar el Inventario de Ciclo de Vida para cada sistema propuesto y el sistema actual.
- Determinar los impactos ambientales causados por los diferentes sistemas.

- Identificar la mejor solución y realizar un análisis costo-beneficio.
- Determinar el grado de contribución a la reducción de impactos ambientales (específicamente los que deterioren la calidad del aire) en la CDMX.

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

En el objetivo general de este trabajo de tesis se mencionan tres grandes conceptos: la CDMX, los métodos de rehabilitación de carpetas asfálticas y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Estos conceptos constituyen la base sobre la cual se va a sustentar metodológicamente la investigación realizada. Por lo que, en este capítulo se analizarán las relaciones que tienen entre sí, así como los antecedentes, definiciones y resultados importantes obtenidos en publicaciones relevantes al tema en cuestión. La subdivisión de temas en este capítulo se llevará a cabo siguiendo el orden y la estructura mostrada en la Figura 1.

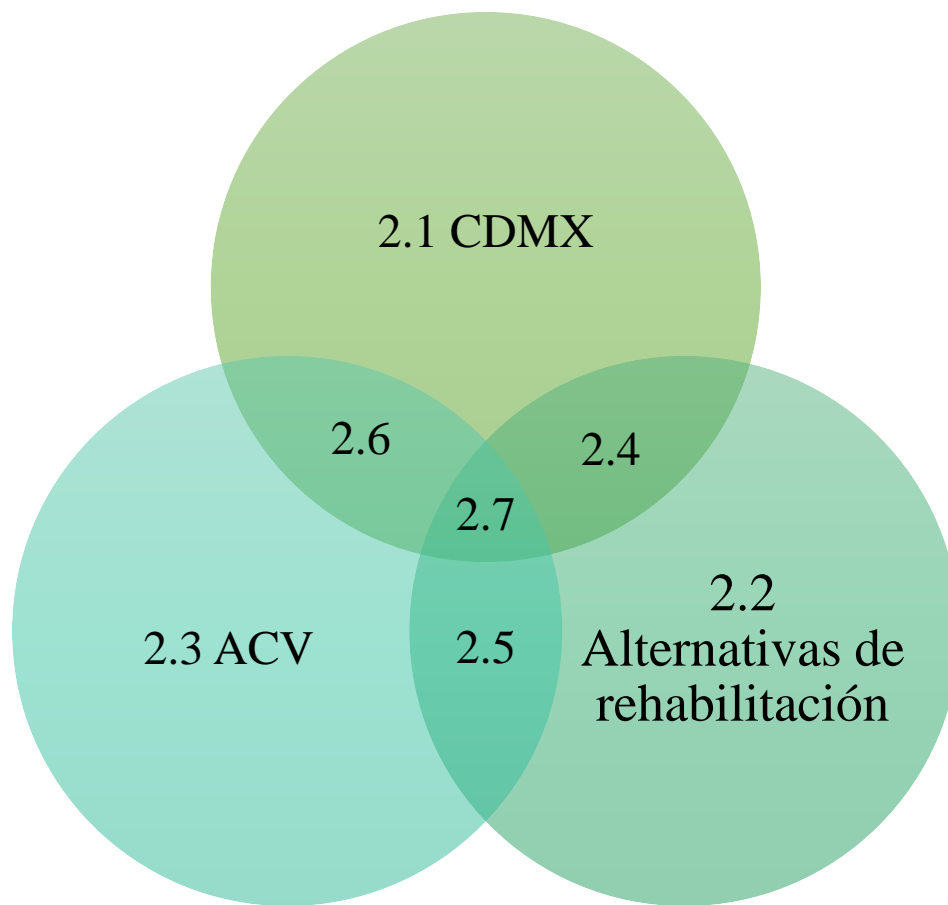


Figura 1. Estructura del marco teórico.

2.1 Ciudad de México

La contaminación en la Ciudad de México es un problema que está latente durante todo el año ya que; debido a la altitud, los cambios de estaciones se caracterizan por tres tipos de clima. La temporada seca y cálida, la cual se distingue por sistemas de alta presión que

inducen cielos claros, lo que promueve procesos fotoquímicos que derivan en la producción de Ozono (O_3) y otros tipos de oxidantes. Adicionalmente, esto favorece a la carga secundaria de aerosoles a través de reacciones químicas, polvo y la quema de biomasa. Los vientos débiles y fuertes inversiones de temperatura durante la noche propician concentraciones de contaminantes que se mantienen en la mañana y persisten durante las horas pico del tránsito de vehículos. La época fría y seca, durante la cual hay inversiones más drásticas y la concentración de contaminantes durante la mañana es mayor. Finalmente, en la temporada de lluvias, la cantidad de partículas suspendidas es menor, pero la concentración de Ozono es mayor debido a las reacciones químicas que ocurren antes de las lluvias por la tarde (Molina et al., 2009).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) se encarga de monitorear la calidad del aire de la ZMCM, y cuando se detectan concentraciones elevadas de ozono (O_3), partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$) que afecte a la población general o a grupos sensibles, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) pone en acción el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la CDMX. Este programa consta en la disminución del tránsito vehicular, así como de eventos o actividades al aire libre.

Es por esto que se necesitan buscar y promover nuevas tecnologías y procesos para disminuir los impactos ambientales dentro de las labores necesarias que se tienen que llevar a cabo de forma cotidiana en una urbe como la CDMX.

2.2 Alternativas de rehabilitación

En esta sección del marco teórico se definen los diferentes tratamientos de conservación y rehabilitación de carpetas asfálticas, definiendo el estado de la práctica y el arte de forma global y en las carreteras de México.

En primer lugar, se debe de definir el vocabulario y los términos técnicos usados a lo largo del presente documento. Por lo que, primero se debe definir lo que es un pavimento. Algunas fuentes mencionan que se le denomina pavimento a todo el sistema de capas que permiten el tránsito de vehículos sobre su superficie sin que el conjunto sufra deformaciones perjudiciales al transmitir las cargas y distribuirlas como esfuerzos soportables por sus capas interiores y por la terracería. Las capas que lo conforman son la subbase fabricada con una mezcla de grava, arena y tepetate; la base, con una composición similar a la anterior pero con un mayor contenido de pétreos que la vuelven más resistente; y la carpeta, que se constituye

por concreto asfáltico o concreto hidráulico y con su cara superior con capacidad para aceptar el rodamiento de los neumáticos y la abrasión (Díaz Infante de la Mora, 2018).

Es importante indicar que existen distintos tipos de pavimento. Uno es el pavimento rígido, el cual, debido a la alta rigidez de la capa de rodadura, produce una buena distribución de cargas, dando como resultado deformaciones bajas en las capas inferiores. Estos sistemas generalmente constan de una losa de concreto hidráulico. Por otro lado, los pavimentos flexibles distribuyen una mayor concentración de deformaciones en toda la estructura, como se puede observar en la Figura 2 (Miranda-Rebolledo, 2010). Estos pavimentos son compuestos de una superficie de rodamiento a base de una carpeta asfáltica. En México contamos con aproximadamente 95,000 km de carreteras pavimentadas, de las cuales el 5 % (4750 km) son pavimentos rígidos y el resto son pavimentos flexibles (Güereca, Juárez-López, and Ossa-López, 2014).

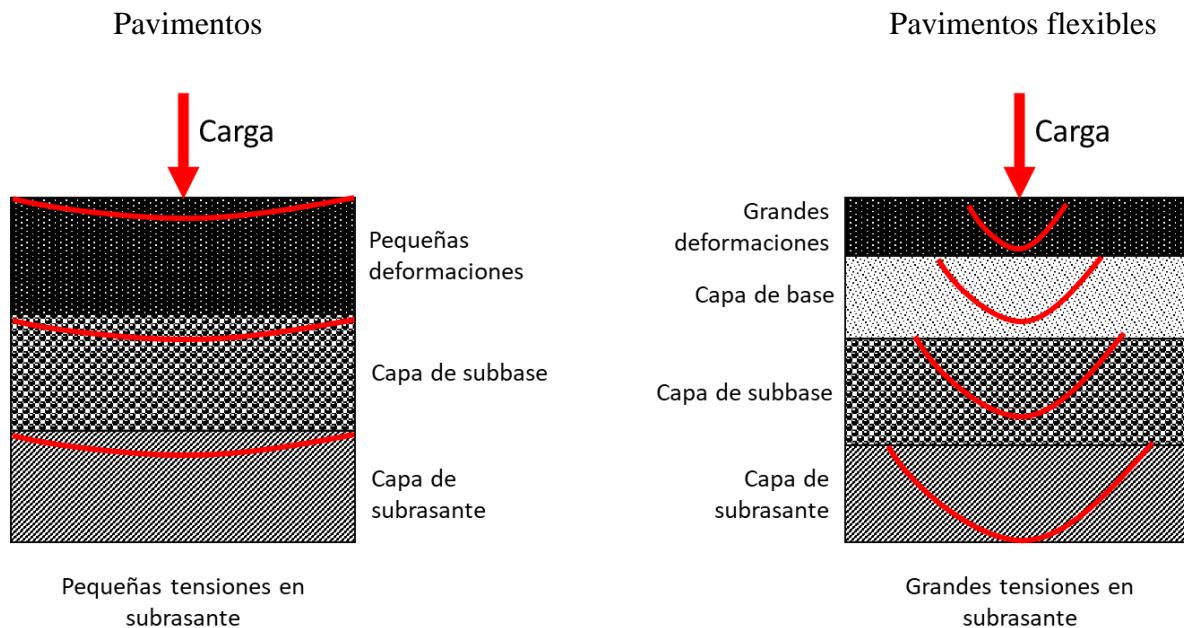


Figura 2. Comportamiento de distintos tipos de pavimentos al aplicarles una carga puntual. Fuente: Adaptado de Miranda-Rebolledo, 2010.

En esta tesis se analizan únicamente los tratamientos de mantenimiento realizados a los sistemas flexibles, los cuales se componen de materiales aglomerantes de color oscuro, constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, originarios del petróleo crudo, el cual es destilado para la obtención del Asfalto. De acuerdo a su uso, se pueden clasificar los tipos de asfaltos en dos grupos generales (Miranda-Rebolledo, 2010):

1. Asfaltos para pavimentos
 - a. Cementos asfálticos:

Preparados específicamente para pavimentación, ya que es un material aglomerante, muy adhesivo, impermeable y duradero. Se denominan por las letras CA.
 - b. Asfaltos rebajados

También son llamados asfaltos diluidos, líquidos o “Cut-backs”, son el producto de la dilución de cemento asfáltico con destilados del petróleo, lo que les otorga una mayor viscosidad a menores temperaturas.
 - c. Emulsiones asfálticas

Son materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificante, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico (SCT, 2006).

Tomando en cuenta las diferentes definiciones y nomenclatura utilizada para referirse a la capa superior de una estructura de pavimento flexible, en esta tesis se toma como definición de superficie de rodadura la que se utiliza para definir a una carpeta de concreto asfáltico en el catálogo de secciones estructurales de pavimentos para las carreteras de la República Mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes: “La carpeta asfáltica es aquella que está formada por suelos con características especiales y cemento asfáltico, sobre ella actúan directamente las cargas del tránsito vehicular y en muchos casos se encarga de proporcionar las características funcionales al pavimento. Estructuralmente, absorbe y transmite los esfuerzos horizontales y verticales a las capas que yacen bajo ella. El desempeño del pavimento flexible incluye tanto el comportamiento estructural como el funcional. El estructural se refiere a la capacidad del pavimento para soportar las cargas del tránsito sin deformaciones permanentes excesivas y sin agrietamiento. El funcional se refiere a la capacidad del pavimento para que la superficie sea cómoda y segura para los usuarios de la carretera” (SCT, 2017). La sección tipo del pavimento, considerada en esta tesis para la

red vial primaria de la CDMX, incluyendo la nomenclatura utilizada a lo largo del documento se muestra en la Figura 3.

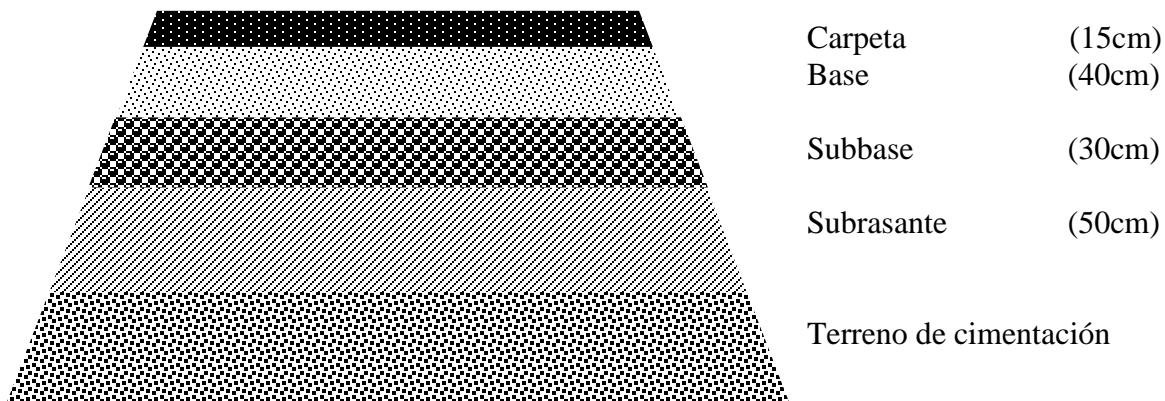


Figura 3. Corte transversal de las capas de un sistema carretero.

Con el paso del tiempo, las carpetas asfálticas se van deteriorando hacia el final de su vida útil, debido al interperismo y a la circulación constante de vehículos, perdiendo sus características iniciales tanto estructurales como de servicio. Es en este punto en donde pueden llegarse a presentar situaciones indeseadas que afecten la integridad del concreto asfáltico y llega el momento de realizar un tratamiento de rehabilitación para arreglar los daños existentes. Existen varias formas en la que una carpeta puede presentar situaciones que requieran rehabilitación. Se pueden definir dos grandes grupos bajo los cuales se engloban la mayor parte de los tipos de fallas más comunes en las carpetas asfálticas, según Miranda-Rebolledo (2010), de la Universidad Austral de Chile, documento que se toma como referencia para esta sección del marco teórico, estas son:

1. Fisuras y grietas

- a. Fisuras y grietas por fatiga. Sus posibles causas son un espesor de estructura insuficiente, deformaciones de la subrasante, rigidización de mezcla asfáltica, problemas de drenaje, compactación deficiente de capa asfáltica, deficiencias en elaboración de mezcla asfáltica o reparaciones mal ejecutadas.
- b. Fisuras y grietas en bloque. Sus posibles causas son la contracción y expansión diaria de la carpeta por variaciones de la temperatura, grietas de contracción, cambio volumétrico del agregado fino, espesor de carpeta inadecuado, baja capacidad de soporte de subrasante.
- c. Grietas de borde. La causa principal es la falta de confinamiento lateral o acotamientos.
- d. Fisuras y grietas longitudinales y transversales. Sus principales causas son la rigidización de la mezcla asfáltica, reflexión de grietas de capas inferiores,

fatiga en la estructura, diferencias de rigidez entre tramo en corte y tramo en terraplén, riego de liga insuficiente o ausente, o espesor insuficiente de carpeta.

- e. Fisuras y grietas reflejadas. Ocurren en las juntas de dos placas de concreto hidráulico, debido al movimiento de éstas y no se atribuye al tránsito.

2. Deterioro superficial

- a. Parches deteriorados. Ocurre cuando existen procesos constructivos deficientes, sólo de cubre zona deteriorada, sin atender los problemas que causaron el daño inicial o cuando hay deficiencias en las juntas.
- b. Baches en carpetas asfálticas y tratamientos superficiales. Ocurre cuando el pavimento es estructuralmente insuficiente, no tiene buen drenaje o presenta algún defecto constructivo.
- c. Ahuellamiento. Esta falla es generada por una deformación plástica de la capa de carpeta asfáltica o capas inferiores, lo que puede llevar a una falla estructural o a baja seguridad de circulación debida a la acumulación de agua.
- d. Deformación transversal. Se generan a causa de una falta de adherencia entre la carpeta superior y la carpeta inferior, a veces debido a una falta de riego de liga o la presencia de líquidos como agua, aceites o solventes.
- e. Exudación. Ocurre cuando existe un exceso de asfalto en la carpeta, y se presenta bajo altas temperaturas o presencia de solventes.
- f. Desgaste. Se presenta con el tiempo debido a la circulación del tránsito, pero también puede deberse al flujo excesivo de agua sobre la carpeta.
- g. Pérdida de agregado. Sus posibles causas son la aplicación irregular de ligante en tratamientos superficiales, problemas de adherencia entre agregado y asfalto, uso de agregados contaminado con finos o muy absorbentes, lluvia durante la aplicación del ligante asfáltico, endurecimiento del asfalto, deficiencia de compactación de la carpeta, contaminación de carpeta asfáltica con aceite o gasolina.
- h. Ondulaciones. Es ocasionado por efectos de aceleración o frenado del tránsito en zonas de altas temperaturas, posibles causas son la sobre compactación de la carpeta y la pérdida de estabilidad de la mezcla asfáltica, entre otros.

En la Figura 4 se muestran imágenes de las fallas mencionadas previamente.



Figura 4. Fisuras, grietas y deterioro superficial común en carpetas asfálticas. Fuente: (Miranda-Rebolledo, 2010).

Los escenarios propuestos a continuación (escenarios uno, dos y tres) están pensados para rehabilitar los daños causados tanto por el deterioro superficial, como los causados por las fisuras y grietas profundas. Para llevar a cabo un tratamiento de rehabilitación descrito en los escenarios de estudio, la carpeta asfáltica debe haber llegado al fin de su vida útil, y se define a este punto cuando se presenten daños por deterioro profundo como lo son las fisuras y grietas por fatiga, fisuras y grietas en bloque, fisuras y grietas longitudinales y transversales y fisuras y grietas reflejadas. Esta condición de deterioro en el pavimento se muestra en la Figura 5.

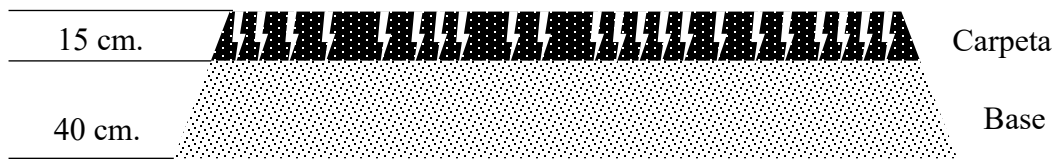


Figura 5. Diagrama mostrando deterioro profundo de la carpeta al final de su etapa de vida útil.

2.3 Análisis de Ciclo de Vida

“El ACV es una herramienta que permite evaluar los impactos ambientales de productos o servicios de una forma global porque considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final y todos los vectores involucrados.”(Güereca, 2006).

La Organización Internacional de la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) tiene normado el ACV mediante las normas ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006). En estas normas se establece que el ACV consta de cuatro fases (Figura 6):

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.
- b. **Función:** Para poder comparar los impactos generados por el ciclo de vida de dos productos o servicios, es necesario que ambos 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 (ISO, 2006). Distintas categorías de impacto pueden ser evaluadas con distintas metodologías, por ejemplo, IPCC, ReCiPe o CML. Para esta tesis se utiliza únicamente la metodología de evaluación ReCiPe.
- 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, se debe procurar siempre que los datos obtenidos sean representativos (ISO, 2006). 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/o 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 (ISO, 2006). 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). Dado el enfoque de esta tesis, y tomando en cuenta que un estudio de punto final tiende a generar mucha incertidumbre, se opta por realizar un estudio de punto medio.
- 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. En estos pasos es en donde necesitamos recurrir a distintos programas de cálculo de impacto ambiental, los cuales se discuten con mayor profundidad en la sección 2.3.1 Software.

- 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.



Figura 6. Estructura de un Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: adaptado de ISO 14040 Fuente: adaptado de (ISO,2006).

Existen tres categorías de ACV que componen la evaluación integral de impactos: Análisis de Ciclo de Vida Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida Económico y Análisis de Ciclo de Vida Social. Para los alcances de esta tesis sólo se van a considerar los primeros dos tipos de análisis, ya que el Análisis de Vida Social (basado de igual manera en las normas ISO 14040 y 14044), requiere de una inversión importante de recursos en tiempo y económicos, los cuales quedan fuera del alcance de esta tesis y no es posible recabar datos de manera presencial debido a las condiciones generadas por la pandemia debido a COVID-19. No obstante, el Análisis de Ciclo de Vida Ambiental y el Análisis de Costos del Ciclo de Vida que se llevan a cabo son más que suficientes para sustentar la toma de decisiones de manera informada y responsable.

2.3.1 Software

Para apoyar la fase de Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV) es de mucha ayuda recurrir a software especializado, por lo cual en este apartado del marco teórico se mencionan y discuten (ref. Apéndices) (Caballero Güereca, 2020) distintas herramientas computacionales que apoyan en la modelación de los resultados de ciclo de vida e incluyen bases de datos que ayudan a llenar carencias de información que se presentan en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV).

Para decidir cuál de los softwares podría apoyar en mejor manera el desarrollo de esta tesis, se realizó una encuesta a personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Dr. Alejandro Jesús Padilla Rivera), con el objetivo de obtener información de valor en cuanto a distintos aspectos de algunos de los programas con los que cuenta el Grupo de Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad (CIVICCS), del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para realizar estudios de ACV.

En esta sección se muestran una serie de tablas que incluyen los valores subjetivos otorgados por la persona encuestada a cada categoría, utilizando símbolos para generar un gradiente de calificación: **X**; siendo la calificación más negativa (equivalente a un 1 en escala numérica), y hasta **✓**; siendo la calificación más positiva (equivalente a un 5 en escala numérica). Los softwares incluidos en la encuesta se describen a continuación.

2.3.1.1 OpenLCA



Figura 7. Logo de openLCA (GreenDelta, 2020).

El software OpenLCA fue creado en 2006 por Andreas Ciroth, Michael Srocka y Jutta Hildenbrand. Es “open source” y gratuito, por lo que es una de las herramientas más utilizadas para la realización de ACV. OpenLCA es capaz de calcular de forma rápida y confiable análisis de sustentabilidad o ACV; presentando una visión detallada de los factores que causan impactos ambientales, categorizados por proceso, flujo o categoría de impacto y localización geográfica. Tiene la capacidad de exportar e importar tanto modelos como bases de datos; interfaz amigable, eficiente y en una variedad de idiomas; implementación continua de actualizaciones a las bases de datos o por medio de nuevas herramientas (GreenDelta, 2020).

Tabla 1: Evaluación de características de openLCA. Fuente: Encuesta realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera

Concepto	Evaluación
Costo	X ✓
Interfaz de usuario intuitiva	X ✓
Facilidad de aprendizaje	X ✓
Calidad de las bases de datos	X ✓
Precisión de resultados y cálculos	X ✓
Prestigio	X ✓

2.3.1.2 GaBi



Figura 8. Logo de GaBi (thinkstep, 2020).

GaBi proviene de las palabras en alemán “Ganzheitliche Bilanzierung”, que significa balance holístico. Es un software creado hace más de 25 años para facilitar el manejo de ACV. Esta herramienta es considerada la solución para las nuevas generaciones de sostenibilidad de productos y tiene un poderoso motor de ACV capaz de las siguientes aplicaciones: diseño de productos que cumplan con estándares ambientales, reducir el uso de materiales, energía y recursos, desarrollo de productos con huellas ambientales menores, hacer más eficientes las cadenas de valor, diseñar y optimizar productos y procesos para la reducción de costos, crear y reportar declaraciones de sustentabilidad en productos ante equipos de marketing o ante entidades gubernamentales, desarrollo de procesos de manufacturación que cumplan con responsabilidades sociales (thinkstep, 2020).

Tabla 2: Evaluación de características de GaBi. Fuente: Encuesta propia realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera

Concepto	Evaluación
Costo	X ✓
Interfaz de usuario intuitiva	X ✓
Facilidad de aprendizaje	X ✓
Calidad de las bases de datos	X ✓
Precisión de resultados y cálculos	X ✓
Prestigio	X ✓

2.3.1.3 Umberto LCA+



Figura 9. Logo de Umberto (ifu Hamburg, 2020).

Umberto LCA+ es un software creado en 1998 por el Instituto de Informática Ambiental de Hamburg (IFU Hamburg) y es una de las soluciones líder para ACV y muy recomendado por expertos de la industria, consultoría, investigación y educación. Esta herramienta es capaz de: integrar datos del inventario desde Excel de forma sencilla, así como sincronizar y actualizar automáticamente al editarlo; bases de datos de ciclo de vida integradas Ecoinvent y GaBi, con 13 300 y 7 000 sets de datos de Suiza y de Alemania, respectivamente; identificación de “Hot Spots” en el ACV al poder visualizar e identificar en el diagrama procesos con altos potenciales impactos; ACV económico integrado que permite asignar costos a los diferentes procesos y de esa manera, poder presentar un informe completo para toma de decisiones, por lo que un producto sustentable también se vuelve económicamente efectivo; visualización que promueve la toma de decisiones gracias a la generación automática de diagramas de Sankey (ifu Hamburg, 2020).

desde Excel de forma sencilla, así como sincronizar y actualizar automáticamente al editarlo; bases de datos de ciclo de vida integradas Ecoinvent y GaBi, con 13 300 y 7 000 sets de datos de Suiza y de Alemania, respectivamente; identificación de “Hot Spots” en el ACV al poder visualizar e identificar en el diagrama procesos con altos potenciales impactos; ACV económico integrado que permite asignar costos a los diferentes procesos y de esa manera, poder presentar un informe completo para toma de decisiones, por lo que un producto sustentable también se vuelve económicamente efectivo; visualización que promueve la toma de decisiones gracias a la generación automática de diagramas de Sankey (ifu Hamburg, 2020).

Tabla 3: Evaluación de características de Umberto LCA+. Fuente: Encuesta propia realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera

Concepto	Evaluación
Costo	X ✓
Interfaz de usuario intuitiva	X ✓
Facilidad de aprendizaje	X ✓
Calidad de las bases de datos	X ✓
Precisión de resultados y cálculos	X ✓
Prestigio	X ✓

2.3.1.4 SimaPro









Figura 10. Logo de SimaPro (PRé, 2020).

SimaPro fue creado hace 30 años por PRé con la meta de transformar la sostenibilidad en algo basado en datos, lo cual sigue siendo el enfoque actual de la empresa. SimaPro es el software de ACV líder, con una reputación de más de 25 años y académicos en más de 80 países. Es

capaz de: modelar y analizar ciclos de vida complejos de manera sistemática y transparente, medir el impacto ambiental de los productos o servicios a través de todas las etapas de su

ciclo de vida y de identificar los “Hot Spots” en cada eslabón de la cadena de oferta, desde la extracción de materias primas, a manufactura, distribución, uso y disposición final (PRé, 2020).

Tabla 4: Evaluación de características de SimaPro. Fuente: Encuesta propia realizada al Dr. Alejandro Padilla Rivera

Concepto	Evaluación
Costo	X  ✓
Interfaz de usuario intuitiva	X  ✓
Facilidad de aprendizaje	X  ✓
Calidad de las bases de datos	X  ✓
Precisión de resultados y cálculos	X  ✓
Prestigio	X  ✓

2.3.1.5 Elección de Software

Al calcular un promedio aritmético de las calificaciones otorgadas a cada software en sus respectivas categorías de evaluación se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5:

Tabla 5: Promedio aritmético de calificaciones de los Softwares.

Software	Promedio aritmético de calificaciones
openLCA	3.83
GaBi	2.50
Umberto LCA+	4.33
SimaPro	4.00

Los resultados de la encuesta arrojan que; realizando un promedio aritmético y sin peso diferencial de los factores evaluados, el software mejor calificado es Umberto LCA+, con 4.33 puntos obtenidos de un total de 5.00.

Por esta razón se concluye que el software que se va a utilizar como herramienta para realizar el ACV de las diferentes opciones de tratamientos de rehabilitación en la CDMX es Umberto LCA+, agradeciendo el apoyo del grupo de investigación de Ciclo de Vida, cambio climático y Sostenibilidad (CIVICCS) con el acceso al servidor con el software instalado con su licencia de uso institucional.

2.4 Métodos de rehabilitación de carpetas asfálticas en la Ciudad de México

En esta sección se describen y se discuten los principales métodos de reencarpetado que se utilizan en las vialidades principales de la CDMX. En este sentido, el fresado parcial y reencarpetado es el tratamiento de rehabilitación de carpetas primordialmente utilizado en las últimas décadas, el cual consta en el fresado y reposición de los 7 centímetros en la superficie de la carpeta asfáltica. Este método de rehabilitación es relativamente económico a corto plazo, no obstante, al reemplazar únicamente la mitad superficial de la capa de concreto asfáltico, persisten los daños y agrietamientos profundos descritos en la sección 2.2. Al existir agrietamiento por debajo de la capa de carpeta recién colocada, la nueva carpeta se va a degradar prematuramente, lo cual se ha observado que ocurre después de tres años, aproximadamente. Esta limitada vida útil tiene como consecuencia la repetición continua de tratamientos de rehabilitación dentro del período de estudio. Lo cual lleva a un mayor costo a largo plazo y a un pobre rendimiento ambiental.

Existe una gran variedad de métodos de rehabilitación, no obstante, solamente los que se consideran más adecuados para las condiciones prevalecientes de la CDMX se estudian en esta tesis, los cuales son: fresado total y reencarpetado, reciclaje en frío: Full Depth Reclamation (FDR) y reciclaje en caliente: Hot In-place Recycling (HIR). Dichos escenarios se describen en la sección 3.2 Descripción y límites de los sistemas.

2.5 Análisis de Ciclo de Vida de métodos de rehabilitación de pavimentos

El ACV es una poderosa herramienta para evaluar impactos ambientales de una forma holística. En México, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México realiza investigación en ACV de productos y servicios conforme a las normas ISO14044; no obstante, hasta este momento no se ha realizado aun un estudio enfocado específicamente a los tratamientos de rehabilitación para las carpetas asfálticas de la CDMX. En otros países (Estados Unidos, por ejemplo) se tiene una legislación más estricta de los impactos ambientales generados por sus carreteras, lo cual propicia un mayor desarrollo de estudios de Ciclo de Vida de sistemas de rehabilitación de pavimentos. En esta sección se presentan los estudios de Análisis de Ciclo de Vida internacionales, aplicados a pavimentos.

2.5.1 Evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero del asfalto mantenimiento de pavimentos: un estudio de caso en China.

En este artículo de 2020, se comparan las emisiones de gases de efecto invernadero de 16 alternativas distintas de mantenimiento de carreteras mediante la metodología de ACV ISO 14040/44 para el caso de estudio de la ciudad de Xi'an, en la provincia Shaanxi, al noroeste de China. La Unidad Funcional Utilizada es de tres carriles con 3.75 metros de ancho, con una profundidad de pavimento asfáltico de 15 centímetros y 2 kilómetros de longitud. El área total de análisis es de 22,500 metros cuadrados. En los resultados se describe que, para lograr el mismo rendimiento técnico, el reciclaje en frío genera más de el doble de emisiones de gases de efecto invernadero que el reciclaje en caliente. Esto se debe a el incremento en procesos de rehabilitación, por lo cual se enuncia que el diseño de un plan de rehabilitación durante la vida útil de la carretera puede disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Los mayores impactos se reportaron en la etapa de extracción de materias primas para los 16 escenarios de mantenimiento y rehabilitación.

2.6 Análisis de Ciclo de Vida en la Ciudad de México

El ACV debe de realizarse conforme a la norma ISO14044, como se ha mencionado anteriormente. En México hay muy pocas instituciones que realizan este tipo de análisis y en el caso de la CDMX, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (www.iingen.unam.mx) cuenta con el grupo de investigación en Ciclo de Vida, Cambio Climático y Sostenibilidad (CiViCCS), el cual realiza trabajos de investigación, formación académica y es contratada por empresas privadas y gubernamentales para la realización de este tipo de estudios. Este grupo de investigación es con el cual se cuenta para brindar orientación en la realización de esta tesis de licenciatura.

2.7 Análisis de Ciclo de Vida de carpetas asfálticas en la México

No existen trabajos de investigación relacionados con el impacto ambiental de carreteras y caminos en la CDMX por medio de ACV. Existen por otro lado las llamadas Manifestaciones de Impacto Ambiental (MIA), las cuales son documentos de evaluación de impacto ambiental que deben de entregarse ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) para la realización de obras e infraestructura en México, según lo establece el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

(LGEEPA) (Diario de la Federación, 2013). Una MIA consta en un estudio técnico-científico en el que se analiza la situación actual del ecosistema en el cual se va a llevar a cabo la construcción y se plantean medidas de mitigación de los potenciales impactos que puedan generarse. Existen dos modalidades: la regional, que aplica únicamente para proyectos de grande envergadura como lo son carreteras, parques industriales y acuícolas, planes de desarrollo urbano, etc. y la modalidad particular, en la cual entran todas aquellas obras y actividades que no entren en la categoría regional. Éste estudio tiene como objetivo “prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana” (PROFEPA, 2019).

Se han realizado previamente MIAs de la construcción de carreteras y caminos, como la de la carretera México-Tuxpan (Grupo Selome S.A. de C.V., 2009), y existen también este tipo de estudios en los que se enfocan tanto en los impactos ambientales de la construcción inicial, como en el caso del estudio del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) sobre la construcción y mantenimiento de pavimentos rígidos (Hernández-Michaca, et. al., 2001). Es notable que las MIAs mencionadas previamente únicamente toman en cuenta las etapas de construcción y mantenimiento, y a diferencia de estudios de ACV, no toman en cuenta la extracción de materias primas, los procesos de manufactura, el transporte a sitio o la disposición final de los residuos generados en cada etapa de mantenimiento. En cuando a estudios de ACV pavimentos en México, el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó en 2014 un estudio comparando los impactos ambientales de los sistemas de pavimento flexible con los de pavimentos rígidos (Güereca et al., 2014). En este estudio se tomaron en cuenta las etapas de extracción de materias primas, procesado, transporte, construcción, mantenimiento y disposición final para ambos escenarios y se encontró que para 17 de las 18 categorías de impacto utilizadas, el pavimento flexible es el escenario que genera los mayores impactos, en su mayor parte debido a el proceso de refinería donde se produce el asfalto y el consumo de combustible en el traslado del material residual en la etapa de disposición final. Ninguna de estas etapas que se encontraron con la mayor contribución a los impactos ambientales se considera en una MIA.

Los métodos de conservación y rehabilitación de pavimentos en la CDMX no han cambiado durante décadas, por lo que, los baches y la mala condición de la superficie de rodadura no son relevantes únicamente en la situación presente, lo han sido ya por mucho tiempo. El ACV no sólo busca disminuir el impacto ambiental (expresado por medio de distintas categorías de impacto) de un producto o servicio, sino que busca también su optimización, y de esa forma ser una herramienta más de apoyo en la toma de decisiones buscando una vida útil más

larga, disminuyendo la frecuencia con la que un producto debe ser reemplazado o con la que un servicio debe repetirse. Este mismo propósito se sigue con el desarrollo de la tesis, llevando a cabo de una forma más completa la cuantificación de impactos ambientales, siendo el procedimiento aquí descrito una herramienta de soporte en la toma de decisiones, proponiendo distintos procedimientos para la rehabilitación de los pavimentos de la CDMX, considerando una mayor vida útil y así, disminuir los impactos ambientales que generan.

Existe ya suficiente información al respecto como para comparar el método actual de rehabilitación de carpetas con nuevas tecnologías desarrolladas por países con un mayor grado de desarrollo como lo son Alemania y Estados Unidos. La necesidad de este estudio se ve claramente reflejada en la ausencia de estudios previos que comparen los sistemas que se analizan en esta tesis.

2.8 Análisis de costos de ciclo de vida

Un método usado desde hace décadas en Estados Unidos es el Análisis de Costos de Ciclo de Vida (ACCV), aplicado por la Administración Federal de Carreteras de ese país (FHWA, por sus siglas en inglés) en 1998 con su proyecto de demostración No. 115, en el cual se usa el método de Valor Presente Neto (VPN) para poder realizar una comparación no sesgada de diferentes alternativas con enfoque de toma de decisiones racionales. Basándose en esta metodología, la Alianza de Pavimentos Asfálticos (APA) desarrolló un software de distribución libre para llevar a cabo este tipo de análisis de una manera eficiente. El método consiste en sumar el costo inicial de construcción con los costos de rehabilitación multiplicados por un factor de ajuste por inflación y restar el valor de rescate o vida útil restante (VUR) multiplicada por un factor de ajuste por inflación o devaluación de la moneda. El costo inicial se debe basar en experiencias documentadas y sólo debe tomarse en cuenta los costos directamente relacionados con la carpeta (sin tomar en cuenta la señalización vertical u horizontal, por ejemplo); los costos debidos a la etapa de mantenimiento deben basarse en documentación histórica realista para no inflar los costos del ciclo de vida desproporcionadamente; y los costos de rescate deben indicar cuánto tiempo de servicio tiene restante el asfalto al dar por terminado el tiempo de análisis (que normalmente se encuentra entre 30 y 30 años, para poder incorporar al menos una rehabilitación de cada opción de tratamiento). El factor de ajuste por inflación promedio en Estados Unidos es de 3.7%, variando desde 2.3% a 6% y el valor más usado es de 4% (APA, 2011), sin embargo otros factores de ajuste, como la tasa de interés también son utilizados. La tasa de interés, similar a la inflación, representa un balance del riesgo asumido, y es determinado por el banco central

de cada país (el Banco de México en el caso de nuestro país) y es determinado por varios factores con el propósito de nivelar la oferta y la demanda en el mercado, ya que cuando la tasa de interés es alta, se propicia el ahorro, y cuando la tasa de interés es baja, se propicia el consumo. En el caso de México, la tasa de interés más alta en años recientes fue del 8.25% anual, en agosto de 2019, pero debido a la pandemia por COVID-19, la tasa de interés ha bajado a un 4% anual a febrero de 2021 (Expansión, 2021).

Este método, al ser muy general se puede aplicar para la obtención de los costos del ciclo de vida de las alternativas de rehabilitación comparadas en el presente documento, sin embargo, los factores descritos en el documento de la APA (2011), no pueden ser utilizados para el caso de la CDMX, por esta razón se recurrirá a bibliografía y referencias externas en las que se mencionen los factores de ajuste necesarios para poder traer el valor de los futuros procesos de rehabilitación y de recuperación a VPN.

CAPÍTULO 3 : ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA AMBIENTAL

3.1 Definición de objetivo y alcance del Análisis Ciclo de Vida Ambiental

3.1.1 Objetivo

La norma ISO 14040/44 describe que el ACV debe contener su propio objetivo, el cual se establece como el objetivo general de la tesis, el cual se encuentra en la sección 1.4 Objetivo General.

3.1.2 Función

Proveer una superficie de rodamiento regular, segura y durable, que sea capaz de distribuir las cargas a las capas de base y subbase (las cuales quedan fuera del alcance del ACV realizado), cumpliendo con la calidad necesaria para poder soportar las cargas debidas al tránsito, de manera que los vehículos puedan circular de manera segura y sin circunstancias que propicien daños o peligros como lo son baches o falta de adherencia en situaciones climáticas ordinarias.

3.1.3 Unidad Funcional

La Unidad Funcional (UF), que se utilizará como base para la comparación de los impactos de los tratamientos de rehabilitación es 1km-carril de largo de vialidad principal en la CDMX, de 3.5 metros de ancho, sin incorporaciones, salidas o curvas y sin tomar en cuenta la señalización horizontal o vertical, ya que ésta es constante en todas las alternativas. Con un período de análisis de 30 años para contemplar varias reiteraciones del ciclo de vida de las alternativas de rehabilitación.

3.2 Descripción y límites de los sistemas

Los cuatro escenarios que se analizan se presentan en la Figura 11. Cabe resaltar la existencia de ciclos en los Escenarios 2 y 3, debido a la reutilización de material proveniente del mismo procedimiento de remoción, lo cual disminuye de manera relevante la cantidad de material

requerido por estos dos escenarios sin necesidad de un flujo de material que requiera de transporte, debido a que se trata de procedimientos in-situ.

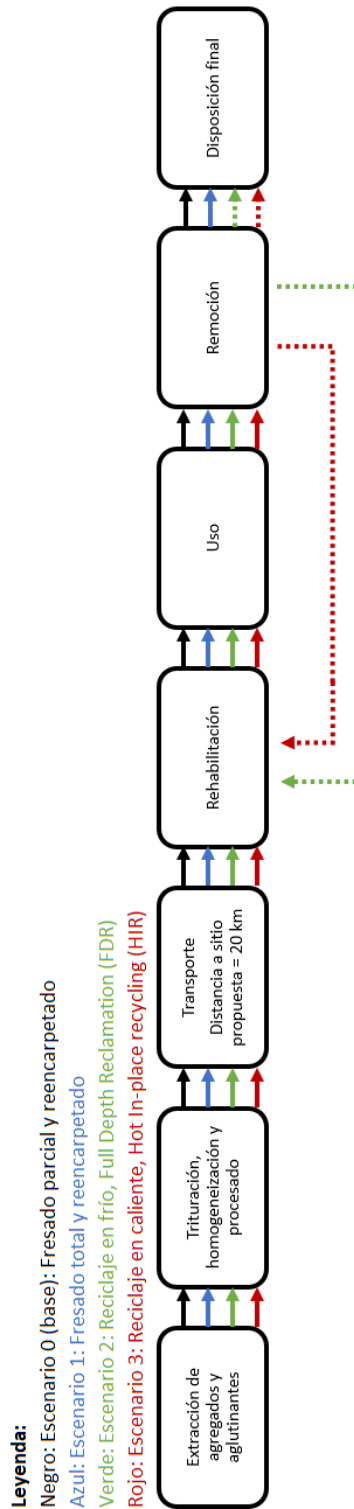


Figura 11. Etapas de Ciclo de Vida de los escenarios de tratamientos de rehabilitación de pavimentos.

A continuación, se describen los cuatro escenarios analizados. Las fichas técnicas de la maquinaria se incluyen en los apéndices de este documento.

3.2.1 Escenario 0: Fresado parcial y reencarpetado

Para este escenario, la vida útil de la carpeta se estima en 3 años, debido a que la profundidad de rehabilitación es de 7cm y a la presencia de grietas en la capa asfáltica que permanece en el pavimento, como se muestra en la Figura 12. La persistencia de estas grietas ocasiona que a corto plazo se reflejen en la superficie rodamiento. La etapa de rehabilitación del Escenario Base consiste en el siguiente procedimiento:

1. Fresado de 7cm mediante fresadora LXL1000A, con potencia de 132kW (Figura 13) (Basso, n.d.).
2. Riego de liga mediante petrolizadora Escudero E-20000, con potencia de 8.9kW (Figura 16) (García, 2012).
3. Colocación de 7cm carpeta en caliente con “finisher” Caterpillar AP1000, con potencia de 93.2kW (Figura 17) (Maquinarias-Pesadas, 2010).
4. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
5. Compactación mediante compactador de neumáticos Caterpillar PS150C, con potencia de 86.5kW (Figura 15) (Caterpillar, 2010).

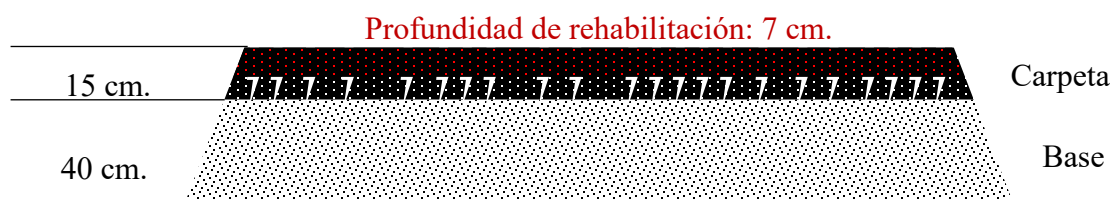


Figura 12. Profundidad de rehabilitación del Escenario Base.



Figura 16. Petrolizadora Escudero E-20000 (García, 2012).



Figura 15. Compactador de neumáticos caterpillar PS150C (Caterpillar, 2010).



Figura 14. Compactador vibratorio liso Hamm 3410. (HAMM, s/f).



Figura 13. Fresadora LXL1000A (Basso, s/f).



Figura 17. Finisher CAT AP1000. (CAT,s/f).

3.2.2 Escenario 1: Fresado total y reencarpetado

Como se observa en la Figura 18, la profundidad de rehabilitación de esta alternativa busca sustituir todo el espesor de la carpeta, lo que conlleva a una vida útil estimada de 15 años. La etapa de rehabilitación del Escenario 1 consiste en el siguiente procedimiento:

1. Fresado de 15 cm mediante fresadora LXL1000A, con potencia de 132kW (Figura 13) (Basso, n.d.).
2. Riego de liga mediante petrolizadora Escudero E-20000, con potencia de 8.9kW (Figura 16) (García, 2012).
3. Colocación de 7.5 cm carpeta en caliente con “finisher” Caterpillar AP1000, con potencia de 93.2kW (Figura 17) (Maquinarias-Pesadas, 2010).
4. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
5. Compactación mediante compactador de neumáticos Caterpillar PS150C, con potencia de 86.5kW (Figura 15) (Caterpillar, 2010)
6. Colocación de 7.5 cm carpeta en caliente con “finisher” Caterpillar AP1000, con potencia de 93.2kW (Figura 17) (Maquinarias-Pesadas, 2010).
7. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
8. Compactación mediante compactador de neumáticos Caterpillar PS150C, con potencia de 86.5kW (Figura 15) (Caterpillar, 2010)



Figura 18. Profundidad de rehabilitación del Escenario 1.

3.2.3 Escenario 2: Reciclaje en frío (Full Depth Reclamation, FDR)

En este escenario se propone la mayor profundidad de rehabilitación en comparación con las demás alternativas, como se observa en la Figura 19. En adición a reemplazar la capa asfáltica, esta técnica estabiliza la parte remanente de carpeta con la parte recuperada de base por medio de un agente estabilizador, en este caso se consideró el uso de asfalto espumado. Por esta razón, se estima la vida útil del Escenario 2 en 20 años. La etapa de rehabilitación del Escenario 2 consiste en el siguiente procedimiento:

1. Fresado de 7 cm mediante fresadora LXL1000A, con potencia de 132kW (Figura 13) (Basso, n.d.).
2. Riego de cal mediante Spreader SW 18 Sci, marca Streumaster, con potencia de 210kW (Figura 22) (WIRTGEN Group, 2019).
3. Estabilización de base mediante WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen, con una potencia de 563kW (Figura 23) (WIRTGEN Group, 2020a).
4. Compactación profunda mediante pata de cabra Caterpillar CS/CP44, con una potencia de 75kW (Figura 20) (Caterpillar, 2009).
5. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
6. Esparcimiento uniforme del material mediante Motoconformadora CAT 120 H, con potencia de 93.21 (Figura 21) (Maquinarias-Pesadas, 2010).
7. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
8. Compactación mediante compactador de neumáticos Caterpillar PS150C, con potencia de 86.5kW (Figura 15) (Caterpillar, 2010)
9. Riego de liga mediante petrolizadora Escudero E-20000, con potencia de 8.9kW (Figura 16) (García, 2012).
10. Colocación de 7 cm carpeta en caliente con “finisher” Caterpillar AP1000, con potencia de 93.2kW (Figura 17) (Maquinarias-Pesadas, 2010).
11. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
12. Compactación mediante compactador de neumáticos Caterpillar PS150C, con potencia de 86.5kW (Figura 15) (Caterpillar, 2010)



Figura 19. Profundidad de rehabilitación del Escenario 2.



Figura 22. Spreader SW 18 Sci, marca Streumaster. (Wirtgen Group, 2019).



Figura 23. WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen. (Wirtgen Group, 2020)



Figura 20. Pata de cabra Caterpillar CS/CP44. (Caterpillar, 2009).



Figura 21. Motoconformadora Caterpillar 120H. (MercadoLibre, 2020).

3.2.4 Escenario 3: Reciclaje en caliente (Hot In-place Recycling, HIR)

Como se observa en la Figura 26, la profundidad de rehabilitación de este tratamiento de rehabilitación no alcanza a cubrir la carpeta en su totalidad, debido a las limitaciones de la maquinaria de calentamiento. No obstante, debido a una mayor profundidad de rehabilitación que el Escenario Base, la vida útil de este escenario se estima de 10 años. La etapa de rehabilitación del Escenario 3 consiste en el siguiente procedimiento:

1. Fresado de 5 cm mediante fresadora LXL1000A, con potencia de 132kW (Figura 13) (Basso, n.d.).

2. Calentamiento de 5 cm de carpeta subyacentes mediante calentadores “Panel heating machine HM 4500”, marca Wirtgen con una potencia de 75kW (Figura 24) (WIRTGEN Group, 2020b).
3. Rejuvenecimiento de los 5 cm subyacentes y colocación de 5 cm de carpeta mediante recicladora en caliente Remixer 4500, marca Wirtgen, con una potencia de 240kW (Figura 25) (WIRTGEN Group, 2020b).
4. Compactación mediante compactador vibratorio liso Hamm 3410, con potencia de 155.1kW (Figura 14) (HAMM, n.d.).
5. Compactación mediante compactador de neumáticos Caterpillar PS150C, con potencia de 86.5kW (Figura 15) (Caterpillar, 2010)



Figura 24. Calentador autopropulsado HM 4500 marca WIRTGEN. (WIRTGEN Group, 2020).

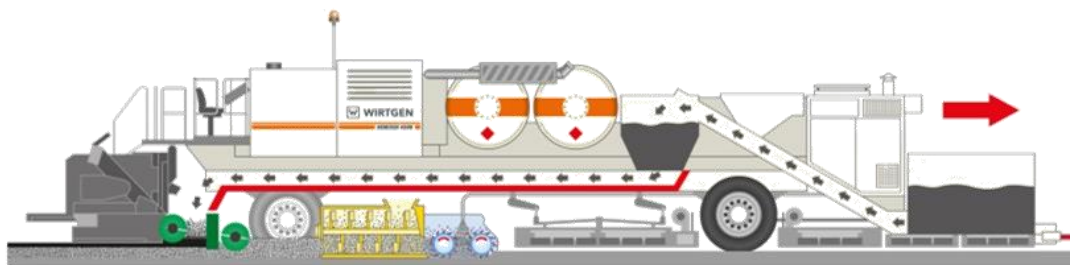


Figura 25. Flujo en el método "Remix Plus" de carpeta asfáltica dentro del reciclador en caliente Remixer 4500 marca WIRTGEN. (WIRTGEN Group, 2020).

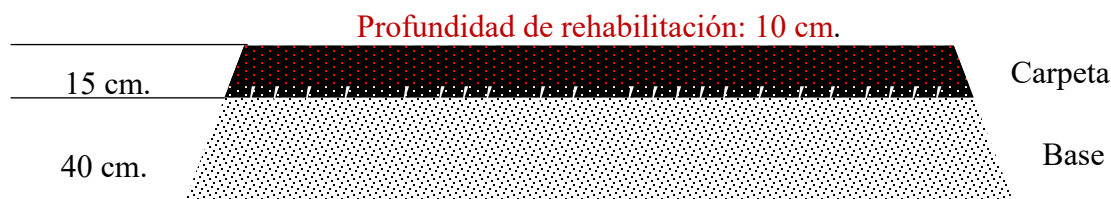


Figura 26. Profundidad de rehabilitación del Escenario 3.

3.2.5 Metodología de evaluación de impacto seleccionada

La metodología seleccionada para la evaluación de impacto de ciclo de vida fue ReCiPe, la cual cuenta con dieciocho categorías de impacto de punto medio (de las cuales se van a seleccionar las más relevantes para el caso de estudio, presentadas a continuación) y tres de punto final (Goedkoop et al., 2013). Las categorías de punto medio tratan con flujos másicos y de energía, mientras que las categorías de punto final tratan directamente con los efectos a la salud humana, lo cual incorpora potenciales errores por el nivel de incertidumbre que supone el cálculo de estas categorías.

3.2.6 Categorías de impacto seleccionadas

La elección de las categorías de impacto es algo de suma importancia en un ACV, ésta debe ser llevada a cabo en relación con el objetivo del estudio, para la correcta comparación y visualización de los impactos ambientales de los productos o servicios de análisis.

De las 18 categorías de impacto ofrecidas por el método ReCiPe, únicamente siete fueron seleccionadas (Tabla 6) para el presente análisis: Cambio climático, acidificación terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos, agotamiento de recursos fósiles, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce y agotamiento de recursos hídricos. La elección de estas categorías de impacto se llevó a cabo a partir de las recomendaciones de artículos de ACV de pavimentos y caminos como Santero, Masanet, Horvath, 2010; Mroueh et al., 2000 y Butt, 2012. La Tabla 6, presenta las categorías de impacto con su abreviación, unidades y factores de caracterización que se usan en la modelación.

Tabla 6. Categorías de impacto seleccionadas.

Categoría de impacto	Abreviación	Unidad	Factor de caracterización
<i>Cambio climático</i>	CC	kg CO ₂ eq.	Potencial de calentamiento global
<i>Acidificación terrestre</i>	AT	kg SO ₂ eq.	Potencial de acidificación terrestre
<i>Formación de oxidantes fotoquímicos</i>	FOF	kg NMVOC eq.	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos
<i>Agotamiento de recursos fósiles</i>	ARF	kg Petróleo eq.	Potencial de agotamiento de recursos fósiles
<i>Toxicidad humana</i>	TH	kg 1.4-DB eq.	Potencial de toxicidad humana
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	EAD	kg P eq.	Potencial de eutrofización de agua dulce
<i>Agotamiento de recursos hídricos</i>	ARH	m ³	Potencial de agotamiento de recursos hídricos

3.3 Análisis de Inventario

En esta sección se presentan los datos que conforman el Inventario de Ciclo de Vida (ICV), de las distintas alternativas de rehabilitación descritas anteriormente. Todas las cantidades fueron calculadas conforme a la Unidad Funcional de 1km-carril con un ancho de 3.5m, tomando en cuenta la vida útil de cada alternativa y las repeticiones necesarias del proceso durante un período de estudio de 30 años, tal y como se definió en la sección 3.1.3 Unidad Funcional.

La organización del inventario se presenta de la Tabla 7 a la Tabla 22, estas tablas contienen los insumos requeridos por el ciclo de vida de cada escenario, divididas por etapa. Se considera que la etapa de uso de las carpetas no genera impactos ambientales, debido a que las emisiones generadas por los vehículos que transitan por una carretera urbana permanecen constantes sin importar el escenario de rehabilitación y dichas emisiones no deben ser atribuidas al tratamiento de rehabilitación, sino a todo el sistema de la carretera. Por otro lado, se pueden considerar los impactos debidos a la afectación a la circulación por obras en

la vía pública, pero tratamientos de rehabilitación como los que se analizan en esta tesis usualmente se realizan de noche en la CDMX, minimizando así la posible afectación a los usuarios, razón por la cual este impacto queda fuera de los alcances de esta tesis. El transporte requerido para la etapa de disposición final se considera junto con la etapa de remoción y el transporte de maquinaria al sitio (necesario tanto en la etapa de rehabilitación como en remoción) se toman en cuenta en la etapa de transporte.

3.3.1 Escenario 0. Fresado parcial y reencarpetado (vida útil: 3 años)

Tabla 7. Inventario de entradas de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetado

ENTRADAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Trituración, homogeneización y procesado			
Asfalto para carpeta	kg	285,670	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para emulsión asfáltica	kg	34,335	(Arquitect, 2016)
Grava	kg	5,104,330	Balance de materia y energía ¹
Agua	l	31,500	(Arquitect, 2016)
Operación de bomba de agua (30 metros)	J	945,000	Balance de materia y energía ²
Trituración y homogeneización de grava	kg	5,104,330	Balance de materia y energía ¹
Transporte			
Material para carpeta	kg	5,390,000	Balance de materia y energía ³
Emulsión Asfáltica	kg	65,835	Balance de materia y energía ³
Transporte Finisher CAT AP1000	tkm	7,617.60	Balance de materia y energía ⁴
Transporte material carpeta	tkm	1,078,000	Balance de materia y energía ⁵
Transporte Petrolizadora Escudero E-20000	tkm	13,367	Balance de materia y energía ⁶
Transporte Compactador vibratorio liso Hamm	tkm	9,356	Balance de materia y energía ⁷
Transporte Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	tkm	9,600	Balance de materia y energía ⁸
Transporte Fresadora LXL1000A	tkm	5,500	Balance de materia y energía ⁹
Rehabilitación			

Material para carpeta transportado	kg	5,390,000	Balance de materia y energía ³
Emulsión Asfáltica transportada	kg	65,835	Balance de materia y energía ³
Operación Finisher CAT AP1000 (93.21kW)	h	125	Balance de materia y energía ⁴
Aceite Finisher CAT AP1000	kg	4.76	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Petrolizadora Escudero E-20000 (8.95kW)	h	0.67	Balance de materia y energía ⁶
Aceite Petrolizadora Escudero E-20000	kg	0.02	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador vibratorio liso Hamm (155.11kW)	h	13.61	Balance de materia y energía ⁷
Aceite Compactador vibratorio liso Hamm	kg	0.46	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar (86.5kW)	h	17.5	Balance de materia y energía ⁸
Aceite Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	kg	0.76	(MS Motorservice International, 2014)
Propano	MJ	30.70	(Maquinarias-Pesadas, 2010)
Uso			
Escenario 0 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Remoción			
Escenario 0 usado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Operación Fresadora LXL1000A (132kW)	h	15.28	Balance de materia y energía ⁹
Aceite Fresadora LXL1000A	kg	5	(MS Motorservice International, 2014)
Disposición final			
Material residual de carpeta fresado	kg	5,929,000	Balance de materia y energía ³
Transporte a relleno sanitario	tkm	118,580	Balance de materia y energía ⁵

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica, Delgado, Gómez, Romero, and Alarcón, 2004).

²A partir de ley del trabajo.

³A partir del principio de continuidad.

⁴A partir de ficha técnica (Maquinarias-Pesadas, 2010).

⁵A partir del peso del material y distancia propuesta de transporte de 20 km.

⁶A partir de ficha técnica (García, 2012).

⁷A partir de ficha técnica (HAMM, n.d.).

⁸A partir de ficha técnica (Caterpillar, 2010).

⁹A partir de ficha técnica (Basso, n.d.).

Tabla 8. Inventario de salidas de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao

SALIDAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Asfalto para carpeta	kg	285,670	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para emulsión asfáltica	kg	34,335	(Arquitect, 2016)
Grava	kg	5,104,330	Balance de materia y energía ¹
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	5,390,000	Balance de materia y energía ²
Emulsión Asfáltica	kg	65,835	Balance de materia y energía ²
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	5,390,000	Balance de materia y energía ²
Emulsión Asfáltica transportada	kg	65,835	Balance de materia y energía ²
Rehabilitación			
Escenario 0 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Uso			
Escenario 0 usado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Remoción			
Material residual de carpeta fresado	kg	5,929,000	Balance de materia y energía ²

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A través del principio de continuidad.

3.3.1.1 Módulos de Ecoinvent utilizados

Tabla 9. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao

ENTRADAS			
Módulo	Unidades	Cantidad por UF	Base de datos
Extracción de agregados y aglutinantes			
Bitumen adhesive compound production, hot [RoW]	kg	285,670	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound production, cold [RoW]	kg	34,335	Ecoinvent 3.6
Market for gravel, crushed [RoW]	kg	5,104,330	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	285,670	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, cold	kg	34,335	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	5,104,330	Ecoinvent 3.6
Water, well, in ground [natural resource/in water]	l	31,500	Ecoinvent 3.6
Water pump operation, electric	J	945,000	Ecoinvent 3.6
Rock crushing	kg	5,104,330	Ecoinvent 3.6
Transporte			
Material para carpeta	kg	5,390,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica	kg	65,835	Elaboración propia
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	7,617.60	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	1,078,000	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	13,367	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	9,356	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	9,600	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	5,500	Ecoinvent 3.6
Rehabilitación			
Material para carpeta transportado	kg	5,390,000	Proceso manual
Emulsión Asfáltica transportada	kg	65,835	Proceso manual
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	156.25	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	4.76	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel < 18.64kW, high load factor	h	0.67	Ecoinvent 3.6

Lubricating oil	kg	0.02	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	28.31	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.46	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	20.30	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.76	Ecoinvent 3.6
Propane, burned in building machine	MJ	30.70	Ecoinvent 3.6
Uso			
Escenario 0 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			
Escenario 0 usado	UF	1	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	27.04	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	5	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Waste asphalt	kg	5,929,000	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	118,580	Ecoinvent 3.6

¹Horas normalizadas a potencia de 74.57kW

Tabla 10. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 0: fresado parcial y reencarpetao

SALIDAS			
Módulo	Unidades	Cantidad por UF	Base de datos
Extracción de materias primas			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	285,670	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, cold	kg	34,335	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	5,104,330	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	5,390,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica	kg	65,835	Elaboración propia
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	5,390,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica transportada	kg	65,835	Elaboración propia
Rehabilitación			
Escenario 0 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia

Uso			
Escenario 0 usado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			
Waste asphalt	kg	5,929,000	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Treatment of waste asphalt, sanitary landfill [RoW]	kg	5,929,000	Ecoinvent 3.6

3.3.2 Escenario 1. Fresado total y reencarpetado (vida útil: 15 años)

Tabla 11. Inventario de entradas de Escenario 1: fresado total y reencarpetado

ENTRADAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Trituración, homogeneización y procesado			
Asfalto para carpeta	kg	122,430	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para emulsión asfáltica	kg	6,867	(Arquitect, 2016)
Grava	kg	2,187,570	Balance de materia y energía ¹
Agua	l	6,300	(Arquitect, 2016)
Operación de bomba de agua (30 metros)	J	189,000	Balance de materia y energía ²
Trituración y homogeneización de grava	kg	2,187,570	Balance de materia y energía ¹
Transporte			
Material para carpeta	kg	2,310,000	Balance de materia y energía ³
Emulsión Asfáltica	kg	13,167	Balance de materia y energía ³
Transporte Finisher CAT AP1000	tkm	3,047.04	Balance de materia y energía ⁴
Transporte material para carpeta	tkm	92,400	Balance de materia y energía ⁵
Transporte Petrolizadora Escudero E-20000	tkm	566.68	Balance de materia y energía ⁶
Transporte Compactador vibratorio liso Hamm	tkm	3,742.4	Balance de materia y energía ⁷
Transporte Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	tkm	3,840	Balance de materia y energía ⁸
Transporte Fresadora LXL1000A	tkm	1,500	Balance de materia y energía ⁹
Rehabilitación			

Material para carpeta transportado	kg	2,310,000	Balance de materia y energía ³
Emulsión Asfáltica transportada	kg	13,167	Balance de materia y energía ³
Operación Finisher CAT AP1000 (93.21kW)	h	50	Balance de materia y energía ⁴
Aceite Finisher CAT AP1000	kg	1.9	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Petrolizadora Escudero E-20000 (8.95kW)	h	0.13	Balance de materia y energía ⁶
Aceite Petrolizadora Escudero E-20000	kg	3.2E-03	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador vibratorio liso Hamm (155.11kW)	h	5.83	Balance de materia y energía ⁷
Aceite Compactador vibratorio liso Hamm	kg	0.2	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar (86.5kW)	h	7.5	Balance de materia y energía ⁸
Aceite Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	kg	0.33	(MS Motorservice International, 2014)
Propano	MJ	6.14	(Maquinarias-Pesadas, 2010)
Uso			
Escenario 1 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Remoción			
Escenario 1 usado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Operación Fresadora LXL1000A (132kW)	h	4.17	Balance de materia y energía ⁹
Aceite Fresadora LXL1000A	kg	1.36	(MS Motorservice International, 2014)
Disposición final			
Material residual de carpeta fresado	kg	3,465,000	Balance de materia y energía ³
Transporte a relleno sanitario	tkm	69,300	Balance de materia y energía ⁵

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A partir de ley del trabajo.

³A partir del principio de continuidad.

⁴A partir de ficha técnica (Maquinarias-Pesadas, 2010).

⁵A partir del peso del material y distancia propuesta de transporte de 20 km.

⁶A partir de ficha técnica (García, 2012).

⁷A partir de ficha técnica (HAMM, n.d.).

⁸A partir de ficha técnica (Caterpillar, 2010).

⁹A partir de ficha técnica (Basso, n.d.).

Tabla 12. Inventario de salidas de Escenario 1: fresado total y reencarpetao

SALIDAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Asfalto para carpeta	kg	122,430	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para emulsión asfáltica	kg	6,867	(Arquitect, 2016)
Grava	kg	2,187,570	Balance de materia y energía ¹
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	2,310,000	Balance de materia y energía ²
Emulsión Asfáltica	kg	13,167	Balance de materia y energía ²
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	2,310,000	Balance de materia y energía ²
Emulsión Asfáltica transportada	kg	13,167	Balance de materia y energía ²
Rehabilitación			
Escenario 1 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Uso			
Escenario 1 usado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Remoción			
Material residual de carpeta fresado	kg	3,465,000	Balance de materia y energía ²

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A través del principio de continuidad.

3.3.2.1 Módulos de Ecoinvent utilizados

Tabla 13. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 1: fresado total y reencarpetao

ENTRADAS			
Módulo	Unidades	Cantidad por UF	Base de datos

Extracción de agregados y aglutinantes			
Bitumen adhesive compound production, hot [RoW]	kg	122,430	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound production, cold [RoW]	kg	6,867	Ecoinvent 3.6
Market for gravel, crushed [RoW]	kg	2,187,570	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	122,430	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, cold	kg	6,867	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	2,187,570	Ecoinvent 3.6
Water, well, in ground [natural resource/in water]	l	6,300	Ecoinvent 3.6
Water pump operation, electric	J	189,000	Ecoinvent 3.6
Rock crushing	kg	2,187,570	Ecoinvent 3.6
Transporte			
Material para carpeta	kg	2,310,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica	kg	13,167	Elaboración propia
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	3,047.04	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	92,400	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	566.68	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	3,742.4	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	3,840	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	1,500	Ecoinvent 3.6
Rehabilitación			
Material para carpeta transportado	kg	2,310,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica transportada	kg	13,167	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	62.5	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.9	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel < 18.64kW, high load factor	h	0.13	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	3.2E-03	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	12.13	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.2	Ecoinvent 3.6

Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	8.7	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.33	Ecoinvent 3.6
Propane, burned in building machine	MJ	6.14	Ecoinvent 3.6
Uso			
Escenario 1 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			
Escenario 1 usado	UF	1	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	7.38	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.36	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Waste asphalt	kg	3,465,000	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	69,300	Ecoinvent 3.6

¹Horas normalizadas a potencia de 74.57kW

Tabla 14. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 1: fresado total y reencarpetao

SALIDAS			
Módulo	Unidades	Cantidad por UF	Base de datos
Extracción de materias primas			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	122,430	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, cold	kg	6,867	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	2,187,570	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	2,310,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica	kg	13,167	Elaboración propia
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	2,310,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica transportada	kg	13,167	Elaboración propia
Rehabilitación			
Escenario 1 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Uso			
Escenario 1 usado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			

Waste asphalt	kg	3,465,000	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Treatment of waste asphalt, sanitary landfill [RoW]	kg	3,465,000	Ecoinvent 3.6

3.3.3 Escenario 2. Reciclaje en frío (FDR) (vida útil: 20 años)

Tabla 15. Inventario de entradas de Escenario 2: reciclaje en frío

ENTRADAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Operación de bomba de agua (30 metros)	J	141,750	Balance de materia y energía ²
Trituración, homogeneización y procesado			
Asfalto para carpeta	kg	85,701	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para emulsión asfáltica	kg	5,150	(Arquitec, 2016)
Grava	kg	1,531,299	Balance de materia y energía ¹
Agua	l	4,725	(Arquitec, 2016)
Operación de bomba de agua (30 metros)	J	141,750	Balance de materia y energía ²
Trituración y homogeneización de grava	kg	1,531,299	Balance de materia y energía ¹
Transporte			
Material para carpeta	kg	1,617,000	Balance de materia y energía ³
Emulsión Asfáltica	kg	9,875	Balance de materia y energía ³
Cal	kg	119,700	Balance de materia y energía ¹⁰
Agua (stabilizer)	l	4,725	Balance de materia y energía ¹¹
Asfalto (stabilizer)	kg	74,393	Balance de materia y energía ¹¹
Transporte Spreader SW 18 Sci Wirtgen	tkm	1,971	Balance de materia y energía ¹²
Transporte WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen	tkm	2,604	Balance de materia y energía ¹¹
Transporte Finisher CAT AP1000	tkm	2,285	Balance de materia y energía ⁴
Transporte material para carpeta	tkm	32,340	Balance de materia y energía ⁵

Transporte Cal	tkm	2,394	Balance de materia y energía ⁵
Transporte Agua (stabilizer)	tkm	2,048	Balance de materia y energía ⁵
Transporte Asfalto (stabilizer)	tkm	1,488	Balance de materia y energía ⁵
Transporte Motoconformador CAT 120 G	tkm	762	Balance de materia y energía ⁴
Transporte pata de cabra Caterpillar CS/CP44	tkm	523	Balance de materia y energía ¹³
Transporte Petrolizadora Escudero E-20000	tkm	326	Balance de materia y energía ⁶
Transporte Compactador vibratorio liso Hamm	tkm	3,640	Balance de materia y energía ⁷
Transporte Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	tkm	3,240	Balance de materia y energía ⁸
Transporte Fresadora LXL1000A	tkm	1,250	Balance de materia y energía ⁹
Rehabilitación			
Material para carpeta transportado	kg	1,617,000	Balance de materia y energía ³
Emulsión Asfáltica transportada	kg	9,875	Balance de materia y energía ³
Cal transportada	kg	119,700	Balance de materia y energía ¹⁰
Agua transportada (stabilizer)	kg	4,725	Balance de materia y energía ¹¹
Asfalto transportado (stabilizer)	kg	74,393	Balance de materia y energía ¹¹
Operación Spreader SW 18 Sci Wirtgen (210kW)	h	0.3	Balance de materia y energía ¹²
Aceite Spreader SW 18 Sci Wirtgen	kg	0.08	(MS Motorservice International, 2014)
Operación WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen (563kW)	h	6.56	Balance de materia y energía ¹¹
Aceite WR XLi Soil Stabilizer Wirtgen	kg	2.69	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Motoconformador CAT 120 G (93.21kW)	h	12.12	Balance de materia y energía ⁴
Aceite Motoconformador CAT 120 G	kg	0.6	(MS Motorservice International, 2014)
Operación pata de cabra Caterpillar CS/CP44 (74.57kW)	h	0.82	Balance de materia y energía ¹³
Aceite pata de cabra Caterpillar CS/CP44	kg	0.09	(MS Motorservice International, 2014)

Operación Finisher CAT AP1000 (93.21kW)	h	37.50	Balance de materia y energía ⁴
Aceite Finisher CAT AP1000	kg	1.43	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Petrolizadora Escudero E-20000 (8.95kW)	h	0.13	Balance de materia y energía ⁶
Aceite Petrolizadora Escudero E-20000	kg	2.40E-03	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador vibratorio liso Hamm (155.11kW)	h	26.25	Balance de materia y energía ⁷
Aceite Compactador vibratorio liso Hamm	kg	1.33	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar (86.5kW)	h	22.50	Balance de materia y energía ⁸
Aceite Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	kg	1.47	(MS Motorservice International, 2014)
Propano	MJ	6.14	(Maquinarias-Pesadas, 2010)
Uso			
Escenario 2 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Remoción			
Escenario 2 usado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Operación Fresadora LXL1000A (132kW)	h	3.47	Balance de materia y energía ⁹
Aceite Fresadora LXL1000A	kg	1.14	(MS Motorservice International, 2014)
Disposición final			
Material residual de carpeta fresado	kg	1,347,500	Balance de materia y energía ³
Transporte a relleno sanitario	tkm	26,950	Balance de materia y energía ⁵

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A partir de ley del trabajo.

³A partir del principio de continuidad.

⁴A partir de ficha técnica (Maquinarias-Pesadas, 2010).

⁵A partir del peso del material y distancia propuesta de transporte de 20 km.

⁶A partir de ficha técnica (García, 2012).

⁷A partir de ficha técnica (HAMM, n.d.).

⁸A partir de ficha técnica (Caterpillar, 2010).

⁹A partir de ficha técnica (Basso, n.d.).

¹⁰Ingeniero Rafael Bernal de empresa CalHidra, comunicación por correo electrónico.

¹¹A través de ficha técnica (WIRTGEN Group, 2020a).

¹²A través de ficha técnica (WIRTGEN Group, 2019).

¹³A través de ficha técnica (Caterpillar, 2009).

Tabla 16. Inventario de salidas de Escenario 2: reciclaje en frío

SALIDAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Asfalto para carpeta	kg	85,701	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para emulsión asfáltica	kg	74,393	Balance de materia y energía ³
Asfalto (Emulsión asfáltica)	kg	5,150	(Arquitect, 2016)
Grava	kg	1,531,299	Balance de materia y energía ¹
Cal	kg	119,700	Balance de materia y energía ³
Agua (stabilizer)	l	4,725	Balance de materia y energía ⁴
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	1,617,000	Balance de materia y energía ²
Emulsión Asfáltica	kg	9,875	Balance de materia y energía ²
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	1,617,000	Balance de materia y energía ²
Emulsión Asfáltica transportada	kg	9,875	Balance de materia y energía ²
Cal transportada	kg	119,700	Balance de materia y energía ²
Agua transportada (stabilizer)	kg	4,725	Balance de materia y energía ²
Asfalto transportado (stabilizer)	kg	74,393	Balance de materia y energía ²
Rehabilitación			
Escenario 2 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Uso			
Escenario 2 usado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Remoción			
Material residual de carpeta fresado	kg	1,347,500	Balance de materia y energía ²

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A través del principio de continuidad.

³Ingeniero Rafael Bernal de empresa CalHidra, comunicación por correo electrónico.

⁴A través de ficha técnica (WIRTGEN Group, 2020a).

3.3.3.1 Módulos de Ecoinvent utilizados

Tabla 17. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 2: reciclaje en frío

ENTRADAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Water pump operation, electric	J	141,750	Ecoinvent 3.6
Quicklime production, milled, loose [RoW]	kg	119,700	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound production, hot [RoW]	kg	74,393	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound production, cold [RoW]	kg	5,150	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound production, hot [RoW]	kg	85,701	Ecoinvent 3.6
Market for gravel, crushed [RoW]	kg	1,531,299	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	85,701	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, cold	kg	5,150	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	1,531,299	Ecoinvent 3.6
Water, well, in ground [natural resource/in water]	l	4,725	Ecoinvent 3.6
Water pump operation, electric	J	141,750	Ecoinvent 3.6
Rock crushing	kg	1,531,299	Ecoinvent 3.6
Transporte			
Material para carpeta	kg	1,617,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica	kg	9,875	Elaboración propia
Quicklime, milled, loose	kg	119,700	Ecoinvent 3.6
Water, well, in ground [natural resource/in water]	l	4,725	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, hot	kg	74,393	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	1,971	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	2,604	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	2,285	Ecoinvent 3.6

Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	32,340	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	2,394	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	2,048	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	1,488	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	762	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	523	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	326	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	3,640	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	3,240	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	1,250	Ecoinvent 3.6
Rehabilitación			
Material para carpeta transportado	kg	1,617,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica transportada	kg	9,875	Elaboración propia
Cal transportada	kg	119,700	Elaboración propia
Agua transportada (stabilizer)	kg	4,725	Elaboración propia
Asfalto transportado (stabilizer)	kg	74,393	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	0.84	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.08	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	49.55	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	2.69	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	15.14	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.6	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	0.82	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.09	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	46.88	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.43	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel < 18.64kW, high load factor	h	0.13	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	2.40E-03	Ecoinvent 3.6

Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	36.25	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.33	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	26.10	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.47	Ecoinvent 3.6
Propane, burned in building machine	MJ	6.14	Ecoinvent 3.6
Uso			
Escenario 2 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			
Escenario 2 usado	UF	1	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	6.15	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.14	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Waste asphalt	kg	1,347,500	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	26,950	Ecoinvent 3.6

¹Horas normalizadas a potencia de 74.57kW

Tabla 18. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 2: reciclaje en frío

SALIDAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	85,701	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, hot	kg	74,393	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, cold	kg	5,150	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	1,531,299	Ecoinvent 3.6
Quicklime, milled, loose	kg	119,700	Ecoinvent 3.6
Water, well, in ground [natural resource/in water]	l	4,725	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	1,617,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica	kg	9,875	Elaboración propia
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	1,617,000	Elaboración propia
Emulsión Asfáltica transportada	kg	9,875	Elaboración propia
Cal transportada	kg	119,700	Elaboración propia
Agua transportada (stabilizer)	kg	4,725	Elaboración propia
Asfalto transportado (stabilizer)	kg	74,393	Elaboración propia

Rehabilitación			
Escenario 2 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Uso			
Escenario 2 usado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			
Material residual de carpeta fresado	kg	1,347,500	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Treatment of waste asphalt, sanitary landfill [RoW]	kg	1,347,500	Ecoinvent 3.6

3.3.4 Escenario 3. Reciclaje en caliente (HIR) (vida útil: 10 años)

Tabla 19. Inventario de entradas de Escenario 3: reciclaje en caliente

ENTRADAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Trituración, homogeneización y procesado			
Asfalto para carpeta	kg	61,215	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para Binder	kg	3,524	Balance de materia y energía ¹
Grava	kg	1,093,785	Balance de materia y energía ¹
Agua	l	100	Balance de materia y energía ¹⁰
Operación de bomba de agua (30 metros)	J	3000	Balance de materia y energía ²
Trituración y homogeneización de grava	kg	1,093,785	Balance de materia y energía ¹
Transporte			
Material para carpeta	kg	1,155,000	Balance de materia y energía ³
Binder	kg	3,624	Balance de materia y energía ³
Transporte Panel heating machine HM 4500	tkm	4,728	Balance de materia y energía ¹⁰
Transporte Remixer 4500	tkm	5,748	Balance de materia y energía ¹⁰
Transporte material para carpeta	tkm	23,100	Balance de materia y energía ⁵
Transporte Binder	tkm	72.79	Balance de materia y energía ¹⁰
Transporte Compactador vibratorio liso Hamm	tkm	2,426	Balance de materia y energía ⁷

Transporte Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	tkm	3,240	Balance de materia y energía ⁸
Transporte Fresadora LXL1000A	tkm	2,000	Balance de materia y energía ⁹
Rehabilitación			
Material para carpeta transportado	kg	1,155,000	Balance de materia y energía ³
Binder transportado	kg	3,624	Balance de materia y energía ³
Operación Panel heating machine HM 4500 (75kW)	h	16.67	Balance de materia y energía ¹⁰
Aceite Panel heating machine HM 4500	kg	3.19	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Remixer 4500 (240kW)	h	61.67	Balance de materia y energía ¹⁰
Aceite Remixer 4500	kg	4.19	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador vibratorio liso Hamm (155.11kW)	h	2.92	Balance de materia y energía ⁷
Aceite Compactador vibratorio liso Hamm	kg	0.1	(MS Motorservice International, 2014)
Operación Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar (86.5kW)	h	3.75	Balance de materia y energía ⁸
Aceite Compactador de neumáticos PS150C Caterpillar	kg	0.16	(MS Motorservice International, 2014)
Propano	MJ	2,302.6	(Maquinarias-Pesadas, 2010)
Uso			
Escenario 3 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Remoción			
Escenario 3 usado	UF	1	Balance de materia y energía ³
Operación Fresadora LXL1000A (132kW)	h	5.56	Balance de materia y energía ⁹
Aceite Fresadora LXL1000A	kg	1.82	(MS Motorservice International, 2014)
Disposición final			
Material residual de carpeta fresado	kg	1,540,000	Balance de materia y energía ³
Transporte a relleno sanitario	tkm	30,800	Balance de materia y energía ⁵

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A partir de ley del trabajo.

³A partir del principio de continuidad.

⁴A partir de ficha técnica (Maquinarias-Pesadas, 2010).

⁵A partir del peso del material y distancia propuesta de transporte de 20 km.

⁶A partir de ficha técnica (García, 2012).

⁷A partir de ficha técnica (HAMM, n.d.).

⁸A partir de ficha técnica (Caterpillar, 2010).

⁹A partir de ficha técnica (Basso, n.d.).

¹⁰A partir de ficha técnica (WIRTGEN Group, 2020b)

Tabla 20. Inventario de salidas de Escenario 3: reciclaje en caliente

SALIDAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Asfalto para carpeta	kg	61,215	Balance de materia y energía ¹
Asfalto para Binder	kg	3,524.33	Balance de materia y energía ³
Grava	kg	1,093,785	Balance de materia y energía ¹
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	1,155,00	Balance de materia y energía ²
Binder	kg	3,624	Balance de materia y energía ²
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	1,155,000	Balance de materia y energía ²
Binder transportado	kg	3,624	Balance de materia y energía ²
Rehabilitación			
Escenario 3 rehabilitado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Uso			
Escenario 3 usado	UF	1	Balance de materia y energía ²
Remoción			
Material residual de carpeta fresado	kg	1,540,000	Balance de materia y energía ²

¹A partir de porcentaje de asfalto óptimo (Método Marshall) (Garnica et al., 2004).

²A través del principio de continuidad.

³A partir de ficha técnica (WIRTGEN Group, 2020b)

3.3.4.1 Módulos de Ecoinvent utilizados

Tabla 21. Módulos utilizados en entradas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 3: reciclaje en caliente

ENTRADAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Bitumen adhesive compound production, hot [RoW]	kg	3,524	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound production, hot [RoW]	kg	61,215	Ecoinvent 3.6
Market for gravel, crushed [RoW]	kg	1,093,785	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	61,215	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, hot	kg	3,524	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	1,093,785	Ecoinvent 3.6
Water, well, in ground [natural resource/in water]	l	100	Ecoinvent 3.6
Water pump operation, electric	J	3000	Ecoinvent 3.6
Rock crushing	kg	1,093,785	Ecoinvent 3.6
Transporte			
Material para carpeta	kg	1,155,000	Elaboración propia
Binder	kg	3,624	Elaboración propia
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	4,728	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	5,748	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	23,100	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	72.79	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	2,426.4	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	3,240	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	2,000	Ecoinvent 3.6
Rehabilitación			
Material para carpeta transportado	kg	1,155,000	Elaboración propia
Binder transportado	kg	3,624	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	16.76	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	3.19	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	53.64	Ecoinvent 3.6

Lubricating oil	kg	4.19	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	4.03	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.1	Ecoinvent 3.6
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	4.35	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	0.16	Ecoinvent 3.6
Propane, burned in building machine	MJ	2,302.6	Ecoinvent 3.6
Uso			
Escenario 3 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Remoción			
Escenario 3 usado	UF	1	Elaboración propia
Machine operation, diesel >= 74.57kW, high load factor	h ¹	9.83	Ecoinvent 3.6
Lubricating oil	kg	1.82	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Waste asphalt	kg	1,540,000	Ecoinvent 3.6
Transport, freight, lorry >32 metric ton, unregulated	tkm	30,800	Ecoinvent 3.6

¹Horas normalizadas a potencia de 74.57kW

Tabla 22. Módulos utilizados en salidas de la modelación de impactos ambientales de Escenario 3: reciclaje en caliente

SALIDAS			
Concepto	Unidades	Cantidad por UF	Fuente de Información
Extracción de materias primas			
Bitumen adhesive compound, hot	kg	61,215	Ecoinvent 3.6
Bitumen adhesive compound, hot	kg	3,524	Ecoinvent 3.6
Gravel, crushed	kg	1,093,785	Ecoinvent 3.6
Trituración, homogeneización y procesado			
Material para carpeta	kg	1,155,00	Elaboración propia
Binder	kg	3,624	Elaboración propia
Transporte			
Material para carpeta transportado	kg	1,155,000	Elaboración propia
Binder transportado	kg	3,624	Elaboración propia
Rehabilitación			
Escenario 3 rehabilitado	UF	1	Elaboración propia
Uso			
Escenario 3 usado	UF	1	Elaboración propia

Remoción			
Waste asphalt	kg	1,540,000	Ecoinvent 3.6
Disposición final			
Treatment of waste asphalt, sanitary landfill [RoW]	kg	1,540,000	Ecoinvent 3.6

3.4 Resultados: Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida.

Esta sección presenta la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, también denominada en el ámbito de ACV, como “Perfil Ambiental”. En la Tabla 23 se presentan los impactos ambientales de las categorías de impacto seleccionadas para todos los escenarios. Las cantidades están referidas a la UF, que como se menciona anteriormente es 1 km-carril de carpeta, con un ancho de 3.5 metros y un período de estudio de 30 años.

Tabla 23. impacto ambiental total por escenario y por categoría de impacto.

Categoría de impacto	Unidad	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
<i>Cambio climático</i>	kg CO ₂ eq.	497,157	143,604	301,776	94,572
<i>Acidificación terrestre</i>	kg SO ₂ eq.	3,213	785	1,193	575
<i>Formación de oxidantes fotoquímicos</i>	kg NMVOC eq.	5,418	1,290	1,593	702
<i>Agotamiento de recursos fósiles</i>	kg Petróleo eq.	469,805	105,522	229,238	96,481
<i>Toxicidad humana</i>	kg 1.4-DB eq.	140,587	34,216	40,584	23,013
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	kg P eq.	97.45	21.07	28.23	15.89
<i>Agotamiento de recursos hídricos</i>	m ³	3,060	645	978	590

Los resultados anteriores se normalizaron y se llevaron a porcentaje, en la Figura 27, tomando como valor de referencia el Escenario Base. Como se puede observar en dicha figura, todas y cada una de las categorías de impacto demuestran el mismo comportamiento: el Escenario Base (fresado parcial y reencarpetao) es el que genera los mayores impactos, seguido por el

Escenario 2 (reciclaje en frío), el Escenario 1 (fresado total y reencarpetado) y el escenario que genera los menores impactos ambientales es el Escenario 3 (reciclaje en caliente).

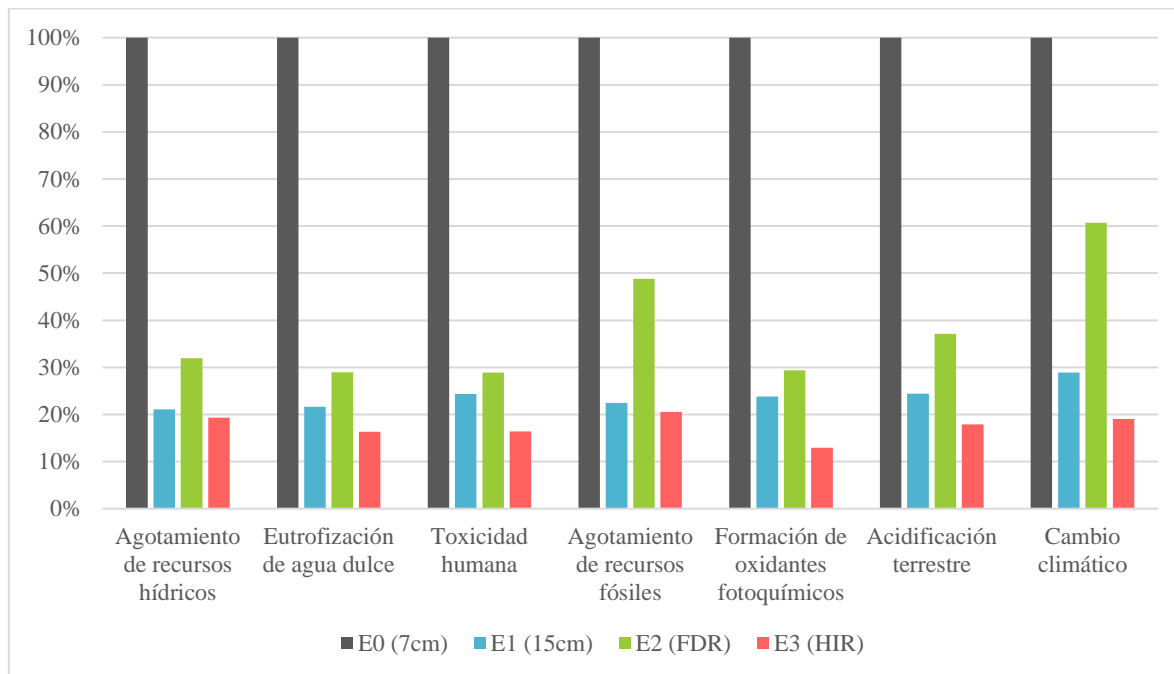


Figura 27. Impacto ambiental total normalizado por escenario y por categoría de impacto.

En la Figura 27 se puede observar de manera gráfica que el Escenario 0 genera los mayores impactos en todas las categorías de impacto analizadas, mientras que el Escenario 3 genera menos daños, seguido del Escenario 1 y el Escenario 2, lo cual se relaciona con la cantidad de materiales y energía que se requieren en cada sistema analizado.

La Tabla 28 presenta la disminución de impactos generada por cada escenario y para cada categoría de impacto, con respecto al Escenario Base (Escenario 0). Aquí se puede observar que el Escenario 1 genera una disminución de impactos mínima del 71% (para la categoría de impacto de cambio climático) y máxima del 79% (para la categoría de impacto de Agotamiento de Recursos Hídricos). El Escenario 2 genera una disminución de impactos mínima del 39% (para la categoría de impacto de cambio climático) y máxima del 71% (para las categorías de impacto de Eutrofización de Agua Dulce, toxicidad humana y Formación de Oxidantes Fotoquímicos). El Escenario 3 genera una disminución de impactos mínima del 79% (para la categoría de impacto de Agotamiento de Recursos Fósiles) y máxima del 87% (para la categoría de impacto de Formación de Oxidantes Fotoquímicos).

Tabla 24. Decrementos porcentuales de los impactos ambientales por categoría de impacto con respecto al Escenario Base

Categoría de impacto	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
<i>Cambio climático</i>	-71%	-39%	-81%
<i>Acidificación terrestre</i>	-76%	-63%	-82%
<i>Formación de oxidantes fotoquímicos</i>	-76%	-71%	-87%
<i>Agotamiento de recursos fósiles</i>	-78%	-51%	-79%
<i>Toxicidad humana</i>	-76%	-71%	-84%
<i>Eutrofización de agua dulce</i>	-78%	-71%	-84%
<i>Agotamiento de recursos hídricos</i>	-79%	-68%	-81%

Es evidente que los tres escenarios propuestos generan menores impactos ambientales en todas y cada una de las categorías seleccionadas, de los cuales, el Escenario 3: reciclaje en caliente o Hot In-place Recycling, es el que genera los menores impactos de todas las categorías de impacto analizadas.

3.5 Interpretación y discusión de resultados

En esta sección se analizan a profundidad los resultados de la Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida de cada uno de los escenarios del estudio, segregándolos por las aportaciones de sus respectivas etapas de ciclo de vida. La interpretación de los resultados obtenidos se lleva a cabo por categoría de impacto, haciendo énfasis en las etapas y escenarios que generan mayores y menores impactos. Todas las gráficas y tablas mostradas están referenciadas a la UF definida anteriormente de 1 km-carril con ancho de 3.5 metros por un período de estudio de 30 años.

3.5.1 Cambio climático

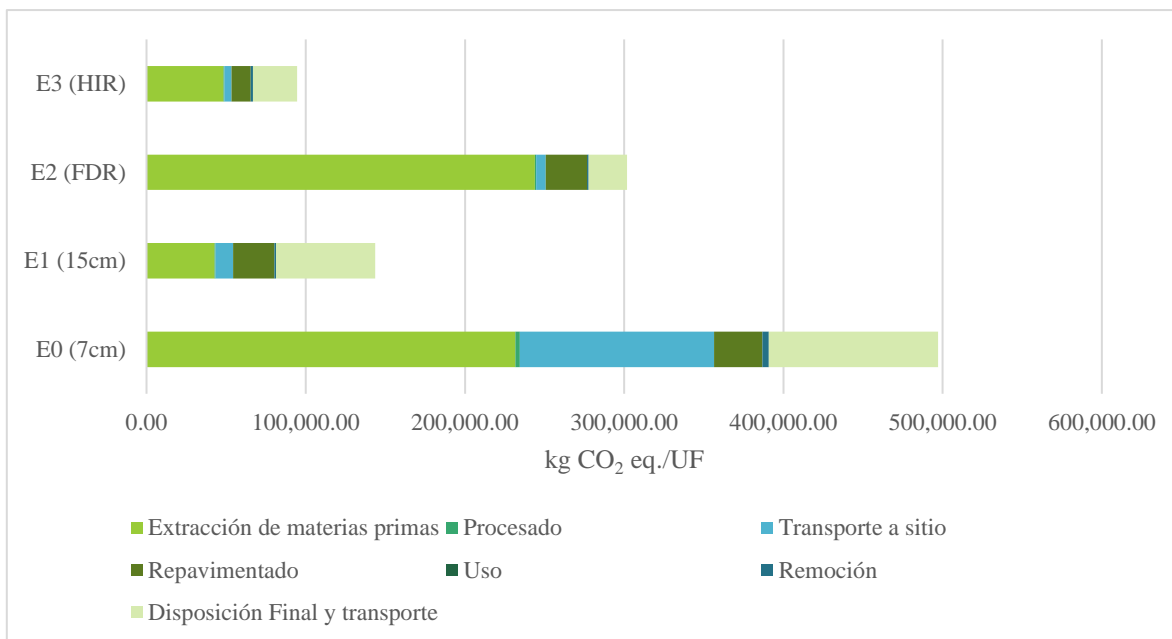


Figura 28. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático.

Tabla 25. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático, en kg CO₂ eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	231,681	42,784	243,929	48,361
Procesado	2,856	525	857	612
Transporte a sitio	121,928	11,075	5,955	4,484
Tratamiento de rehabilitación	30,266	25,932	25,938	12,019
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	4,000	1,092	910	1,454
Disposición final y transporte	106,426	62,197	24,188	27,643
Total	497,157	143,604	301,776	94,572
Comparación porcentual	100%	29%	61%	19%

Tabla 26. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Climático

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	47%	30%	81%	51%
Procesado	1%	0%	0%	1%
Transporte a sitio	25%	8%	2%	5%
Tratamiento de rehabilitación	6%	18%	9%	13%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	1%	1%	0%	2%
Disposición final y transporte	21%	43%	8%	29%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

En la Figura 28 se puede apreciar la contribución de las etapas del ciclo de vida de los escenarios en la categoría de impacto de cambio climático. Es de apreciar que (al igual que en las demás categorías de impacto), el Escenario Base es el que contribuye más a emisiones de Dióxido de Carbono equivalente, con más de 497 t de CO₂ eq. /km carril de vialidad generadas en los 30 años del período de estudio, esto es debido a la corta vida útil de la carpeta asfáltica, ya que tiene que ser sustituida 10 veces para lograr que la vialidad mantenga una calidad que permita el tránsito seguro de los vehículos, de manera que se tapen los baches y se reparen los daños causados por la infiltración de agua a las capas inferiores por las grietas presentes en la carpeta y reflejadas en la superficie de rodamiento. La etapa con el mayor impacto en este escenario es la etapa de extracción de materias primas, dentro de la cual se encuentran los procesos de producción del asfalto y la extracción de la grava, los cuales generan 214,629 kg de CO₂ eq. /km carril de vialidad. Estos resultados concuerdan con Giani et al., 2015 y Tokede et al., 2020, quienes reportan que la extracción de materias primas genera mayor impacto para la categoría de impacto de cambio climático. Lo anterior se debe a la cantidad de material necesario para satisfacer el volumen de reencarpetao.

El Escenario 1: Fresado Total y reencarpetao, tiene el segundo mejor desempeño de los escenarios analizados, con 143 t de CO₂ eq. /km carril de vialidad. En este escenario la etapa

que más emisiones genera es la de disposición final y transporte, con un aporte del 43% al impacto total, como se observa en la

Tabla 26. La disposición final del material residual de la carpeta fresada en relleno sanitario genera 54,675.90 kg de CO₂ eq. /km carril de vialidad, mientras que el transporte sólo genera 7,521.18 kg de CO₂ eq. /km carril de vialidad. En este caso se puede discutir que la modelación de los impactos de los residuos de carpeta en relleno sanitario, fueron adoptados de la base de datos Ecoinvent y corresponden a un contexto suizo (Doka, 2003), lo que sugiere la necesidad de desarrollar estudios bajo condiciones de México que permitan identificar impactos ambientales más precisos con respecto al fin de vida del concreto asfáltico en rellenos sanitarios. Los aspectos que se consideran dentro del módulo de Ecoinvent adoptado son: uso de suelo, uso de infraestructura y maquinaria en relleno sanitario, así como emisiones a la atmósfera y lixiviados provenientes del concreto asfáltico residual (Vidal, Moliner, Martínez, and Rubio, 2013).

El escenario que produce el mayor impacto al cambio climático después del Escenario Base es el Escenario 2: reciclaje en frío o Full Depth Reclamation (FDR). Es de apreciar que, en este escenario, la etapa que más contribuye al impacto total es la de extracción de materias primas, pero a diferencia del Escenario Base, este escenario es únicamente llevado a cabo 1.5 veces en el período de estudio, y, aun así, el impacto de dicha etapa es mayor al de la misma etapa en el Escenario Base. Aquí también se encuentran los procesos de producción de asfalto y extracción de grava, los cuales generan 80,801.80 kg de CO₂ equivalente, pero la extracción y producción de cal por sí sola genera importantes impactos en cambio climático (139,971.26 kg de CO₂ eq. /km carril de vialidad), lo que concuerda con Schlegel et al., 2016, quienes realizaron un ACV comparativo de varias prácticas de construcción de carreteras e identificaron el proceso de producción de cal como uno de los más relevantes en la contribución a cambio climático, esto debido a la composición química de la calcita (CaCO₃), la cual se compone en su mayor parte por carbonato de sodio y al ser procesado y convertido en hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), se liberan grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera (Schlegel et al., 2016). Por la grande aportación de la cal hacia el cambio climático se decidió realizar un análisis de sensibilidad para observar con más claridad los distintos impactos que genera el uso de cal en este escenario. Dicho análisis de sensibilidad se presenta en el punto 3.6.2 Disminución de uso de cal en el Escenario 2.

Es necesario mencionar que los impactos ambientales generados por el Escenario 2 concuerdan con la profundidad de recuperación, la cual es la más grande de todas las propuestas. En el caso de la CDMX, las vialidades primarias no albergan un tránsito tan

grande de vehículos pesados como las carreteras (para las cuales el método de FDR fue diseñado), por lo que probablemente la propuesta descrita en este escenario está sobrada. Adicionalmente, la estabilización de base genera una capa de material con alta resistencia a las cargas por los vehículos, pero la capa asfáltica de siete centímetros que se agrega en la parte superior a la capa estabilizada tiene el propósito de mantener el espesor de concreto asfáltico constante en todos los tratamientos de rehabilitación.

El escenario cuyos impactos son menores respecto al cambio climático es el Escenario 3: reciclaje en caliente o Hot In-place Recycling, esto debido a la capacidad de un solo tipo de maquinaria sustituyendo las labores que en otros escenarios se realiza con un mayor número de equipos, así como a la vida útil esperada de 10 años, lo que significa un bajo número de repeticiones del proceso a lo largo del período de estudio de 30 años. La etapa con mayor impacto en la categoría de cambio climático es la de Extracción de materias primas, con una contribución del 51% del impacto total generado por este Escenario, como se aprecia en la

Tabla 26. Esto es debido a la producción de asfalto, la cual genera 31,820.80 kg de CO₂ equivalente por sí sola. Los resultados que se muestran para este escenario concuerdan con Giani et al., 2015 y con Tokede et al., 2020, quienes reportan grandes contribuciones a la categoría de impacto de cambio climático debido a la extracción de materias primas y su procesado.

En cuanto a cambio climático se observa que, en comparación al Escenario Base, el Escenario 3 es la mejor opción ya que produce el 19% de los impactos para esta categoría, como se aprecia en la Tabla 25.

3.5.2 Acidificación terrestre

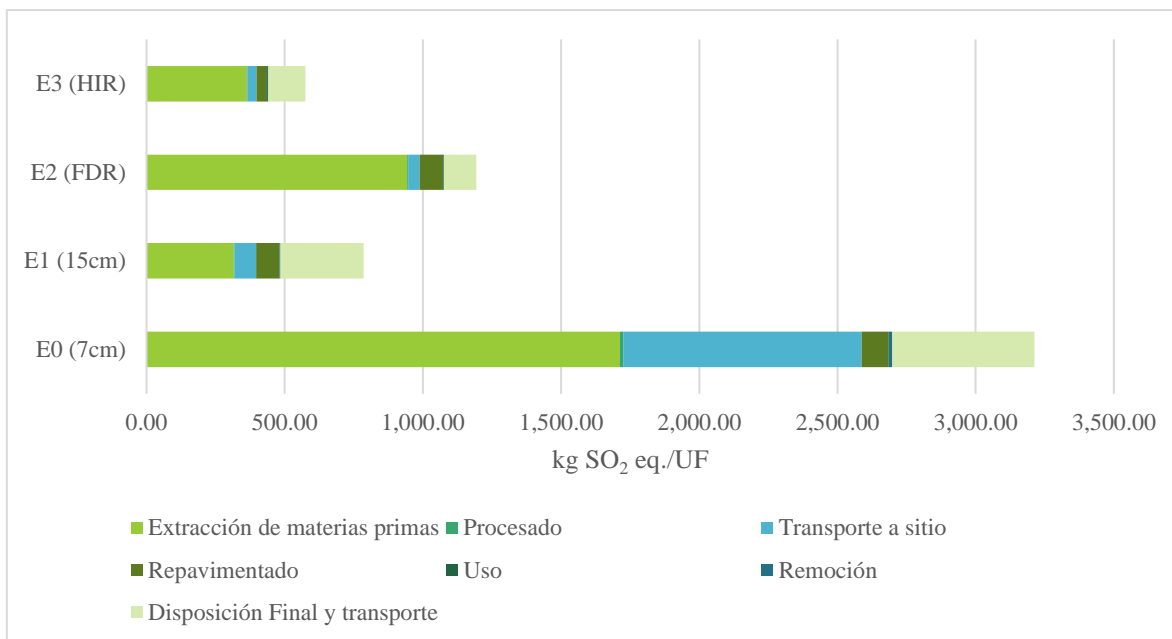


Figura 29. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.

Tabla 27. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre, en kg SO₂ eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	1,713	316	943	363
Procesado	11.14	2.05	3.34	2.39
Transporte a sitio	862	78.33	42.12	31.71
Tratamiento de rehabilitación	98.93	84.75	84.78	38.94
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	13.09	3.57	2.98	4.76
Disposición final y transporte	514	300	116	133
Total	3,213	785	1,193	575
Comparación porcentual	100%	24%	37%	18%

Tabla 28. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	53%	40%	79%	63%
Procesado	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	27%	10%	4%	6%
Tratamiento de rehabilitación	3%	11%	7%	7%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	16%	38%	10%	23%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

La Figura 29 muestra las contribuciones de las etapas de Ciclo de Vida de los cuatro escenarios comparados para la categoría de impacto de Acidificación Terrestre. En dicho gráfico se puede apreciar que el escenario que más impactos genera es el Escenario Base: Fresado parcial y reencarpetao, cuyas etapas más impactantes son las de Extracción de materias primas y el transporte a sitio. Para la extracción de materias primas, el proceso que más contribuye a la Acidificación Terrestre es la producción de asfalto, la cual genera 1,256.83 kg de SO₂ equivalente. Esto concuerda con Santos et al., 2018, quienes realizaron un ACV comparativo de 6 escenarios de pavimentación para una sección de carretera en Francia, considerando como unidad funcional 1 km carril con 3.5m de ancho y 30 años de vida útil (al igual que en esta investigación). En dicho estudio, se identifica que la producción de asfalto es la que mayores impactos en acidificación genera para todos los escenarios analizados, con valores de impacto entre 3,850 y 4,160 kg de SO₂ eq. Lo anterior se debe a la refinera de petróleo, en donde se produce el asfalto. Este sistema se basa en la conversión de crudo de petróleo en productos derivados de petróleo, como gasolina, Diesel, keroseno, coque y asfalto, entre otros y genera emisiones de óxido de nitrógeno y óxidos de azufre que al combinarse con la humedad de la atmósfera producen compuestos acidificantes.

Para la etapa de transporte a sitio, el transporte de la maquinaria, el asfalto y la grava generan 858.09 kg de SO₂ equivalente, lo que se debe al alto número de trayectos de ida y de regreso que deben de ser transportados los equipos por la corta vida útil prevista para este escenario.

El Escenario 1 muestra una contribución similar por las etapas de extracción de materias primas y disposición final y transporte, como se aprecia en la Tabla 28. Dentro de la etapa de materias primas el proceso con más impacto es el de la producción del asfalto, el cual genera 232.24 kg de SO₂ equivalente, lo que concuerda con Santos et al., 2018. Por otro lado, dentro de la etapa de disposición final y transporte, el proceso que genera más impactos es el del tratamiento y disposición del material residual de la carpeta fresada en relleno sanitario. Al igual que en la categoría de impacto anterior, esto se debe a que el material que se renueva en cada proceso de tratamiento de rehabilitación es desechado como residuo en el relleno sanitario en su totalidad, lo que en los escenarios 2 y 3 no ocurre debido a la presencia de reciclaje y por eso sus respectivos impactos de la etapa de disposición final tienen una contribución menor, como se muestra en la Tabla 28.

Como se puede observar en la Tabla 27, el segundo escenario con más impacto en Acidificación Terrestre después del Escenario Base es el Escenario 2. La etapa que sigue produciendo los mayores impactos es la de extracción de materias primas, en la cual se encuentran los procesos de producción de asfalto (el cual genera 669.38 kg de SO₂ equivalente), tal como lo reportan Santos et al., 2018 y en segundo lugar se ubica la producción de cal (el cual genera 136.93 kg de SO₂ equivalente). En este sentido, los resultados de este trabajo parecen contradecir lo publicado por Schlegel et al., 2016, quienes reportan que con el uso de cal en el proceso de pavimentación, logran reducir los impactos en acidificación. Esto se debe a que consideran que con la adición de cal se aumenta la vida útil de la carretera y con ello contabilizan la reducción de impactos.

El Escenario 3 es el que genera menor impacto de los escenarios comparados, siendo la etapa con mayor generación de SO₂ equivalente la de extracción de materias primas, debido a la producción de asfalto, que genera 265.52 kg de dióxido de azufre equivalente, lo cual concuerda con Santos et al., 2018.

En general se observa el mismo comportamiento de la categoría de impacto anterior y el Escenario 3 es la mejor opción debido a su bajo impacto a la acidificación terrestre.

3.5.3 Formación de oxidantes fotoquímicos

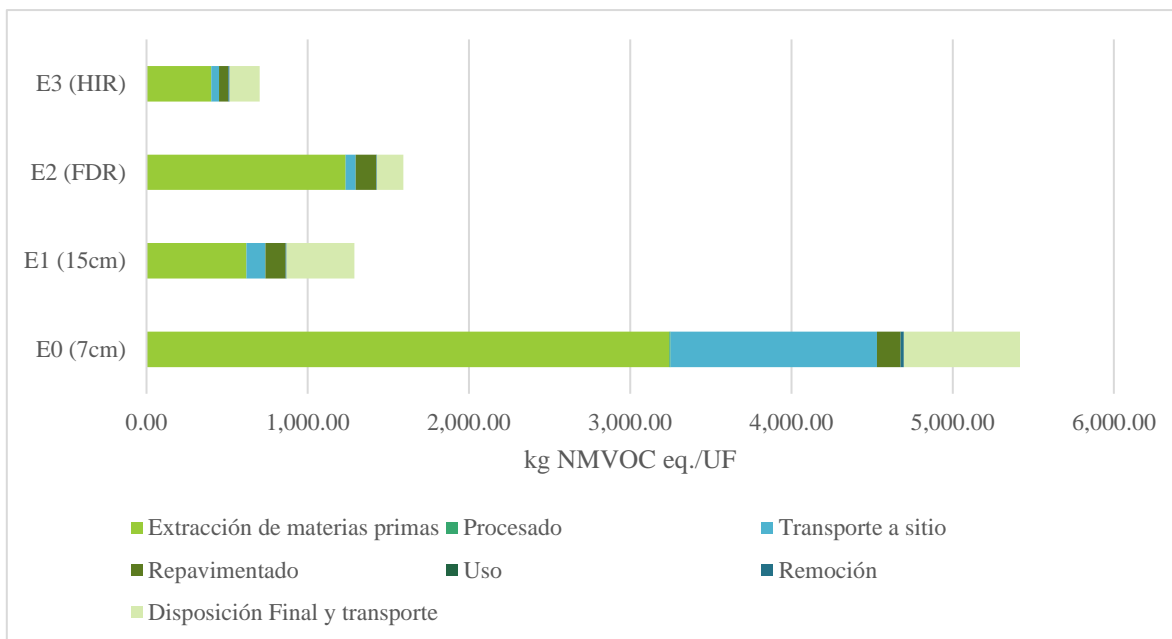


Figura 30. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.

Tabla 29. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en kg NMVOC eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpelado	E1. Fresado total y reencarpelado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	3,243	619	1,234	401
Procesado	7.79	1.43	2.34	1.67
Transporte a sitio	1,280	116	62.50	47.06
Tratamiento de rehabilitación	147	126	126	57.76
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	19.52	5.33	4.44	7.10
Disposición final y transporte	721	422	164	187
Total	5,418	1,290	1,593	702
Comparación porcentual	100%	24%	29%	13%

Tabla 30. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	60%	48%	77%	57%
Procesado	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	24%	9%	4%	7%
Tratamiento de rehabilitación	3%	10%	8%	8%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	13%	33%	10%	27%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

La Figura 30 presenta las contribuciones de las distintas etapas de Ciclo de Vida de los escenarios analizados. En esta categoría de impacto se aprecia una mayor diferencia entre el Escenario Base y los escenarios propuestos.

El escenario con mayores impactos es el Escenario Base, generando un total de 5,417.95 kg de NMVOC equivalentes, de los cuales la etapa de extracción de materias primas genera el 60%, tal y como se aprecia en la Tabla 30. Dentro de esta etapa, el proceso de producción de asfalto genera 2737.18 kg NMVOC equivalentes y la extracción de grava produce 505.32 kg NMVOC equivalentes, esto concuerda con Pantini et al., 2018, quienes evalúan impactos del reciclaje de una tonelada de carpeta en plantas que usan mezclas en caliente (HMA Plants) y plantas que usan mezclas en frío (CMA Plants), y discuten que la producción de asfalto parece ser la más importante para varias categorías de impacto, entre ellas, la formación de oxidantes fotoquímicos. Ellos reportan que el uso de reciclaje en caliente in-situ presenta un mejor desempeño ambiental comparado con reciclaje en plantas de asfalto, lo cual necesita del transporte del material fresado a un sitio de procesado. En la sección

El Escenario 1 sigue el mismo comportamiento mostrado en las categorías de impacto anteriores, siendo la etapa de mayor impacto la de extracción de materias primas, seguida por la etapa de disposición final y transporte. Dentro de la etapa de extracción de materias primas

se encuentra el proceso de producción de asfalto, el cual genera 526.35 kg NMVOC equivalentes. En la etapa de disposición final y transporte se aprecia que sobresale el proceso de tratamiento y disposición en relleno sanitario, generando 342.63 kg NMVOC equivalentes. Lo anterior se debe al uso de combustibles fósiles en el transporte, maquinaria y equipo utilizado en los rellenos sanitarios. Al igual que en las categorías de impacto anteriores, se nota un ahorro en la etapa de transporte comparado con el Escenario Base, esto debido a que rehabilitar la carpeta mediante el método del Escenario Base se tiene que repetir 10 veces en el transcurso de los 30 años del período de estudio, mientras que en el Escenario 1 el proceso de tratamiento de rehabilitación sólo tiene que repetirse 2 veces en el mismo período de tiempo.

En el caso del Escenario 2, la extracción de materias primas genera una mayor contribución del impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en comparación con las otras categorías evaluadas, dado que significa el 77% de los impactos totales. Esto se debe a la producción de asfalto, que genera 940.67 kg NMVOC equivalentes (lo cual se debe al uso de asfalto espumado para la estabilización de la base y a los siete centímetros de carpeta asfáltica que son colocados después de la estabilización, lo cual ya se mencionó anteriormente tiene el propósito de mantener el espesor del concreto asfáltico), mientras que la producción de cal genera en este caso sólo 141.23 kg NMVOC equivalentes.

De nuevo demuestra el Escenario 3 tener los menores impactos, en este caso hacia la Formación de Oxidantes Fotoquímicos. La extracción de materias primas sigue siendo la etapa con mayores impactos, debido de igual manera a la producción de asfalto, generando para este escenario 292.70 kg de NMVOC equivalentes. Esto concuerda también con Pantini et al., 2018. En general, al generar únicamente el 13% de los impactos en cuanto a Formación de Oxidantes Fotoquímicos comparado con el Escenario Base, el Escenario 3 es la mejor opción de los cuatro escenarios analizados.

3.5.4 Agotamiento de recursos fósiles

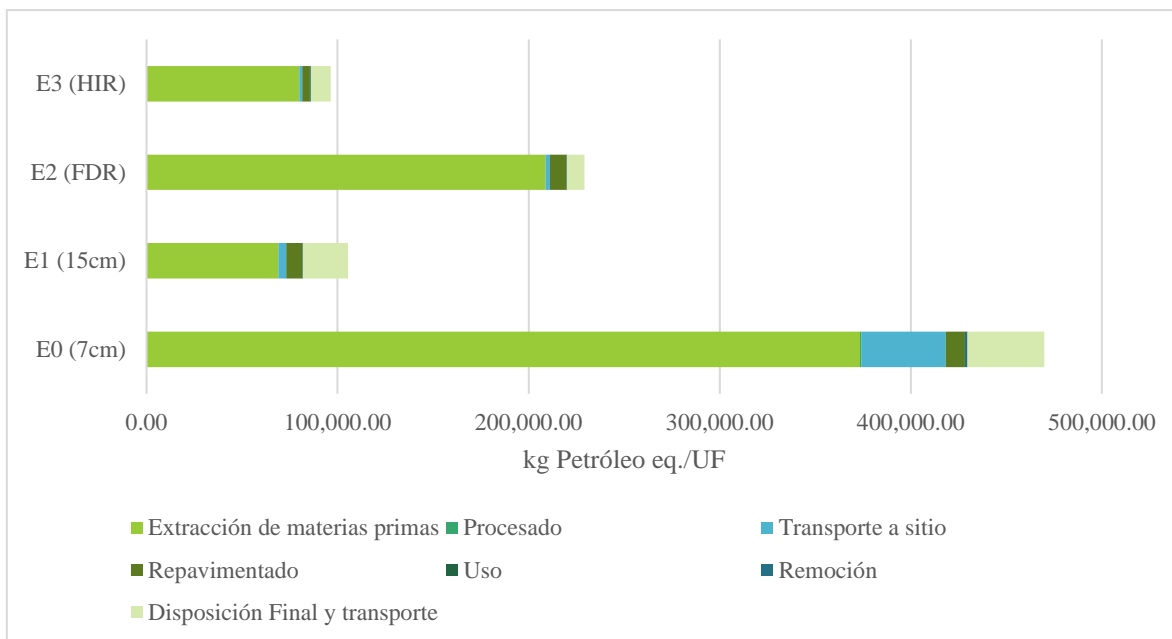


Figura 31. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.

Tabla 31. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles, en kg Petróleo eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	373,414	68,914	208,786	79,771
Procesado	807	148	242	173
Transporte a sitio	44,011	3,998	2,150	1,619
Tratamiento de rehabilitación	10,064	8,620	8,626	3,999
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	1,334	364	304	485
Disposición final y transporte	40,174	23,478	9,130	10,435
Total	469,805	105,522	229,238	96,481
Comparación porcentual	100%	22%	49%	21%

Tabla 32. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	79%	65%	91%	83%
Procesado	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	9%	4%	1%	2%
Tratamiento de rehabilitación	2%	8%	4%	4%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	9%	22%	4%	11%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

La Figura 31 muestra las contribuciones de los distintos escenarios y sus respectivas fases de Ciclo de Vida. Se observa que en esta categoría de impacto de Agotamiento de Combustibles Fósiles es más significativa la fase de extracción de materias primas para todos los escenarios analizados.

Diferentes calidades de petróleo tienen distintos poderes caloríficos, por lo que es necesaria una unidad estándar en función de la energía. Convencionalmente, se utiliza la unidad de kg de petróleo equivalente para referirse a la cantidad de petróleo necesaria para obtener una energía de 41,868,000 J (Joules) o 11,630 Wh (Vatios-hora).

El Escenario Base sigue generando los mayores impactos ambientales, con un total de 469,804.89 kg de Petróleo equivalente. Cabe notar que a pesar de que en otras categorías de impacto el transporte a sitio había salido con un mayor aporte, en este caso el transporte únicamente genera el 9% de los impactos, debido a que la producción de asfalto en la etapa de extracción de materias primas genera un impacto de 348,665.20 kg de Petróleo equivalente, lo que equivale al 74.21% del impacto total, debido a un solo proceso. Esto tiene mucho sentido y concuerda con Hasan et al., 2020, quienes modelaron los impactos para la categoría de disminución de combustibles fósiles para varios tipos de carreteras en los Emiratos Árabes Unidos, e identificaron que la extracción de materias primas y producción

de asfalto, genera las mayores contribuciones, ya que para el proceso de producción de asfalto es necesaria la extracción de Petróleo y su procesado. Cabe hacer notar que el impacto de la etapa de tratamiento de rehabilitación es menor que el de la etapa de transporte a sitio, lo que significa que se crean más impactos en la categoría de impacto de Agotamiento de Recursos Fósiles por el transporte de los materiales y la maquinaria al sitio que por el proceso llevado a cabo con dichos materiales y dichas máquinas.

El Escenario 1 es el que tiene una menor contribución al impacto total debido a la categoría de extracción de materias primas comparada con las contribuciones de la misma etapa en el caso de los otros escenarios, ya que llega al 65%, tal y como se aprecia en la Tabla 32. Dentro de esta etapa se encuentra para este escenario una contribución de 64,368.20 kg de petróleo equivalente por parte del proceso de producción del asfalto, esto debido a la necesidad de extracción de petróleo. Esto concuerda con Hasan et al., 2020.

El Escenario 2 muestra un comportamiento parecido al anterior, y aunque el impacto total sea menos de la mitad que el impacto del Escenario Base, como se aprecia en la Tabla 31, la producción de asfalto genera un agotamiento de recursos fósiles de 101,589.27 kg de petróleo equivalentes y la producción de cal por sí sola con un impacto de 14,201.23 kg de petróleo equivalentes. Esto concuerda parcialmente con Hasan et al., 2020, con respecto a la producción de asfalto, sin embargo no concuerda con el trabajo de Schlegel et al., 2016, quienes reportan que con el uso de cal en el proceso de pavimentación, logran reducir los impactos en agotamiento de recursos abióticos (una categoría de impacto dentro de la cual se incluye el agotamiento de combustibles fósiles. Método CML). Esto se debe a que consideran que con esto se aumenta la vida útil de la carretera y con ello contabilizan la reducción de impactos. Se puede observar que la producción de cal causa grandes impactos en la categoría de cambio climático y en la de Agotamiento de Recursos Fósiles para las consideraciones adoptadas en el presente trabajo.

El escenario con menores impactos para esta categoría es de nuevo el Escenario 3, cuya etapa con mayor contribución es al igual que en el caso de los otros escenarios la etapa de extracción de materias primas, con 74,467.48 kg de petróleo equivalente agotados por el proceso de producción del asfalto. Esto corresponde de igual manera con Hasan et al., 2020.

3.5.5 Toxicidad humana

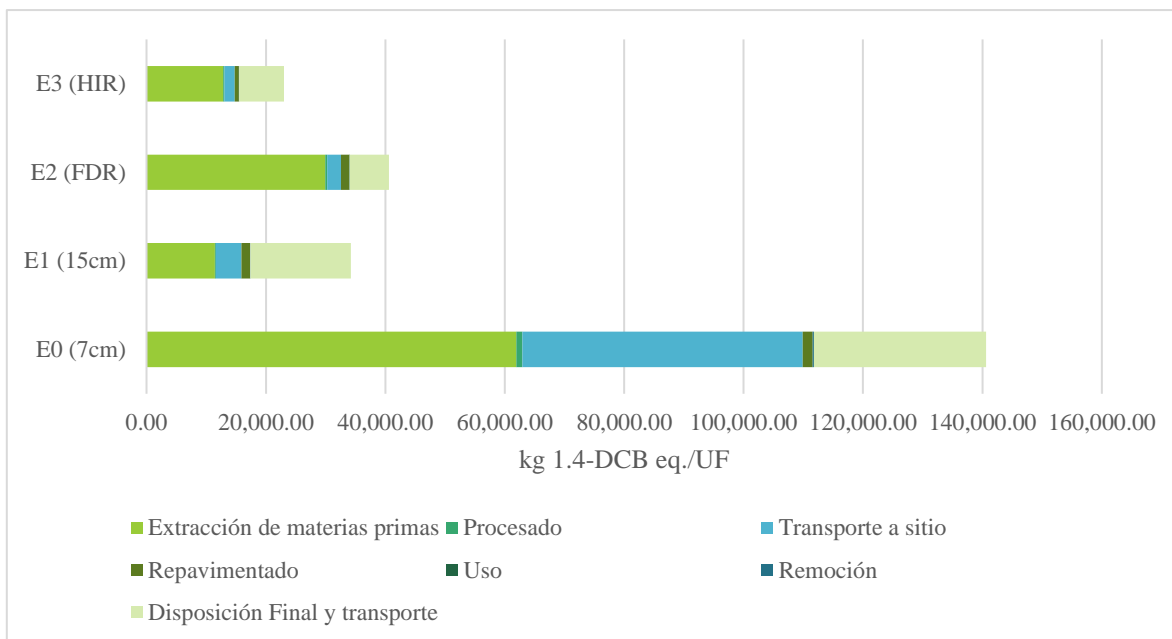


Figura 32. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.

Tabla 33. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana, en kg 1.4-DCB eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	61,942	11,434	29,949	12,837
Procesado	1,018	187	305	218
Transporte a sitio	46,922	4,262	2,292	1,726
Tratamiento de rehabilitación	1,681	1,439	1,441	670
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	224	61.09	50.91	81.37
Disposición final y transporte	28,801	16,831	6,546	7,481
Total	140,587	34,216	40,584	23,013
Comparación porcentual	100%	24%	29%	16%

Tabla 34. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	44%	33%	74%	56%
Procesado	1%	1%	1%	1%
Transporte a sitio	33%	12%	6%	7%
Tratamiento de rehabilitación	1%	4%	4%	3%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0%	0%	0%	0%
Disposición final y transporte	20%	49%	16%	33%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

La toxicidad es la habilidad inherente de algunos químicos de causar daños sistémicos a los organismos vivos o a los ecosistemas; no es un término absoluto y fácil de definir, ya que depende de factores como la concentración, condiciones del receptor, tipo y tiempo de exposición, además de la metodología empleada para realizar la traducción de los datos empíricos de laboratorio a efectos ambientales potenciales. Los conceptos más importantes para caracterizar la ecotoxicidad son el destino, exposición y efectos asociados de las sustancias. La identificación de los impactos implica utilizar datos empíricos toxicológicos estándar para elaborar indicadores de toxicidad para cerca de 200 sustancias y prever su respuesta ambiental. El modelo combina la escala regional, continental y global con las temperaturas geográficas y las propiedades fisicoquímicas de una sustancia para describir su dispersión en el suelo, agua o aire y a partir de esto estimar un índice de impacto, que se relaciona al de la sustancia de referencia 1,4- dicloro benceno/kg de emisión (INE, 2009).

La Figura 32 muestra la contribución de las etapas de Ciclo de Vida de los distintos escenarios analizados para la categoría de impacto de toxicidad humana. En dicho gráfico se puede observar que el Escenario Base es el que genera los mayores impactos, produciendo 140,578.28 kg de 1,4-DCB equivalente, como se aprecia en la Tabla 33. La etapa que más impactos genera es la etapa de extracción de materias primas, correspondiente al 44% de los

impactos totales de este escenario. Dentro de esta etapa se encuentra la producción de asfalto, la cual genera 29,417.46 kg de 1.4-DCB equivalentes. Cabe notar que la etapa de transporte a sitio, a diferencia de otras categorías de impacto genera una gran porción de los impactos de este Escenario, una tercera parte precisamente. En la etapa de transporte, los trayectos de ida y vuelta de la maquinaria necesaria y de los materiales utilizados in-situ generan 46,692.60 kg de 1.4-DCB equivalentes. Tanto la extracción de materias primas, como el transporte, están basados en la combustión de petrolíferos, por lo tanto, se puede discutir que los impactos en toxicidad humana tienen su base en dichos procesos. Esto concuerda parcialmente con Santos et al., 2018, con respecto a la producción de asfalto.

La mayor participación en el impacto total del Escenario 1 viene en este caso de la etapa de disposición final y transporte siendo este el 49%, como se aprecia en la

Tabla 34, dentro de la cual 13,937.11 kg 1.4-DCB equivalentes son generados por el tratamiento y disposición en relleno sanitario del material residual de carpeta asfáltica fresada. Estos valores de toxicidad humana se relacionan con el uso de combustibles fósiles para el transporte y con los procesos químicos que se generan en el relleno sanitario. En este caso es importante recordar, que en el proceso de modelación de impactos de ciclo de vida se utilizó un módulo de la base de datos de Ecoinvent que corresponde a Suiza y toma en cuenta; entre otros aspectos, las emisiones a la atmósfera y lixiviados provenientes del concreto asfáltico residual (Doka, 2003).

En el caso del Escenario 2, el 74% de los impactos para la categoría de impacto de toxicidad humana viene de la etapa de extracción de materias primas, y dentro de ésta, el proceso que genera los mayores impactos es la producción de asfalto, generando 15,038.64 kg 1.4-DCB equivalentes. Esto concuerda con Santos et al., 2018.

El Escenario 3 es para esta categoría de impacto también el escenario con menores impactos. La etapa con mayor contribución es la de extracción de materias primas, con un 56% de los impactos, de los cuales 5,867.48 kg de 1.4-DCB equivalentes son generados por el proceso de producción de asfalto, tal como lo argumenta Santos et al., 2018 y 6,194.27 kg de 1.4-DCB equivalentes son generados por el proceso de producción de grava, lo cual se atribuye al transporte y uso de maquinaria pesada. En ambos casos se utilizan combustibles fósiles que se producen en refinerías, cuyos impactos en toxicidad humana son altos.

El Escenario 3 es el que tiene menores impactos para la categoría de toxicidad humana, lo que concuerda con el comportamiento de la modelación en el caso de las otras categorías de impacto. Cabe recalcar que, en cuanto a toxicidad humana, la etapa de transporte a sitio

presenta un mayor impacto en todos los escenarios en comparación con la combustión de diésel y demás procesos llevados a cabo en la etapa de tratamiento de rehabilitación.

3.5.6 Eutrofización de agua dulce

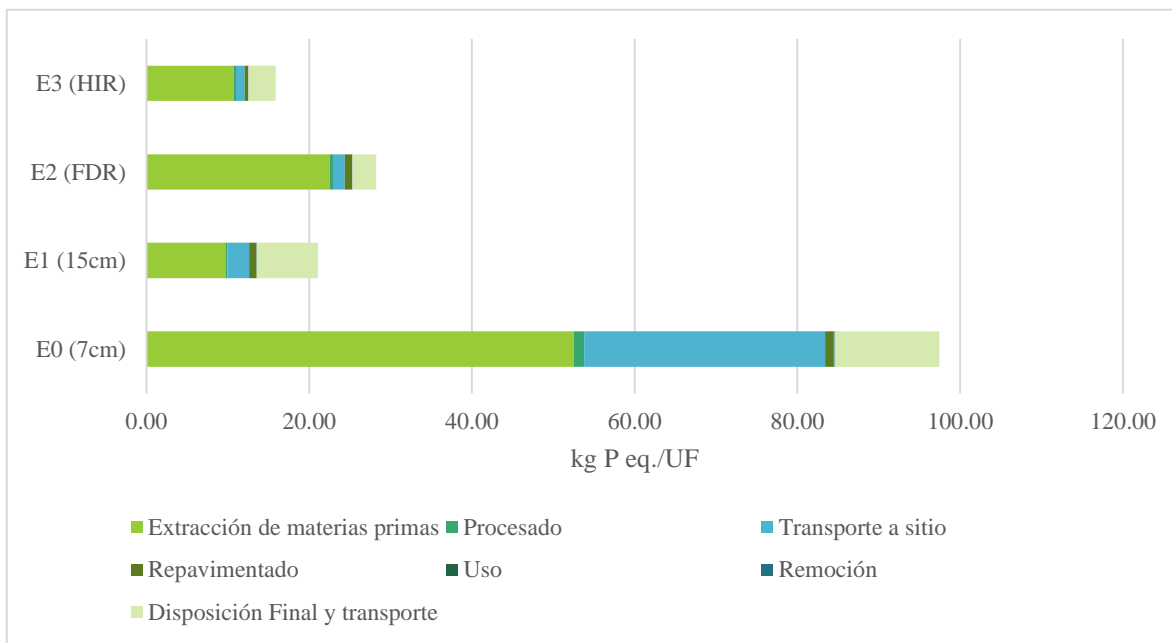


Figura 33. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce.

Tabla 35. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, en kg P eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpelado	E1. Fresado total y reencarpelado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	52.48	9.69	22.54	10.71
Procesado	1.30	0.24	0.39	0.28
Transporte a sitio	29.63	2.69	1.45	1.09
Tratamiento de rehabilitación	1.05	0.90	0.90	0.42
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0.14	0.04	0.03	0.05

Disposición final y transporte	12.85	7.51	2.92	3.34
Total	97.45	21.07	28.23	15.89
Comparación porcentual	100%	22%	29%	16%

Tabla 36. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpelado	E1. Fresado total y reencarpelado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	54%	46%	80%	67%
Procesado	1%	1%	1%	2%
Transporte a sitio	30%	13%	5%	7%
Tratamiento de rehabilitación	1%	4%	3%	3%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0%	0%	0%	0%
Disposición final y transporte	13%	36%	10%	21%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

La Figura 33 muestra la contribución de las distintas etapas del Ciclo de Vida de los escenarios analizados. Se puede observar de nuevo una gran diferencia entre los escenarios propuestos y el Escenario Base, el cual genera los mayores impactos para la categoría de Eutrofización de Agua Dulce; generando 97.45 kg de fósforo equivalente. La etapa que más contribuye a dichos impactos es la de extracción de materias primas, generando un 54% de los impactos totales de este Escenario. Dentro de esta etapa se encuentra el proceso de producción de asfalto, el cual genera 18.1 kg P equivalente y la extracción y producción de grava genera por sí sola 34.38 kg P equivalente, lo que corresponde al 35.28% de los impactos del Escenario Base.

De acuerdo a Schlegel et al., 2016, la generación de NOx (entre otros compuestos), contribuye a la generación de nitratos en el agua superficial y con ello a la eutrofización. Por

lo tanto, los procesos de combustión que emiten óxidos de nitrógeno, contribuyen a la eutrofización y dado que la producción de asfalto en las refinerías se basa en la combustión de combustibles fósiles, ésta es la etapa que genera impactos relevantes, junto con la producción de grava, en donde los procesos de perforación, control de polvo y procesado del material requieren importantes cantidades de agua, lo cual genera impactos en eutrofización y uso de agua (Mavis, 2003).

Al igual que en las otras categorías de impacto, el Escenario 3 es el que genera menos impactos para la categoría de Eutrofización de Agua Dulce. En este caso la etapa con mayores impactos es la de extracción de materias primas, dentro de la cual se encuentran los procesos de producción de asfalto, con un impacto de 3.34 kg P equivalentes y la producción de grava, con un impacto de 7.37 kg P equivalente.

En el caso del Escenario 2, el 80% de los impactos vienen de la etapa de extracción de materias primas, dentro de la cual se encuentran la producción de Cal, con un impacto de 3.46 kg P equivalentes; la producción de asfalto, con un impacto de 8.77 kg P equivalentes y la producción de grava, con un impacto de 10.31 kg P equivalentes. Lo anterior se aborda en los trabajos de Schlegel et al., 2016 y de Mavis (2003).

El Escenario 3 es el más conveniente para esta categoría de impacto, al igual que en las anteriores. Es importante denotar que, en caso de Eutrofización de Agua Dulce, el proceso más contaminante es la generación de grava para todos los escenarios analizados. Esto se debe a que las operaciones de producción de grava, que implican taladrar, control de polvo y procesado del material requieren importantes cantidades de agua, la cual se escurre a cuerpos de agua y en éste proceso acarrea compuestos de nitrógeno y fósforo que generan eutrofización (Mavis, 2003).

El Escenario 1 tiene impactos promedio entre los últimos dos escenarios expuestos, generando 21.07 kg P equivalentes, cuya etapa con mayor contribución (al igual que en los escenarios 2 y 3) es la extracción de materias primas, lo que concuerda con Mavis, 2003.

3.5.7 Agotamiento de recursos Hídricos

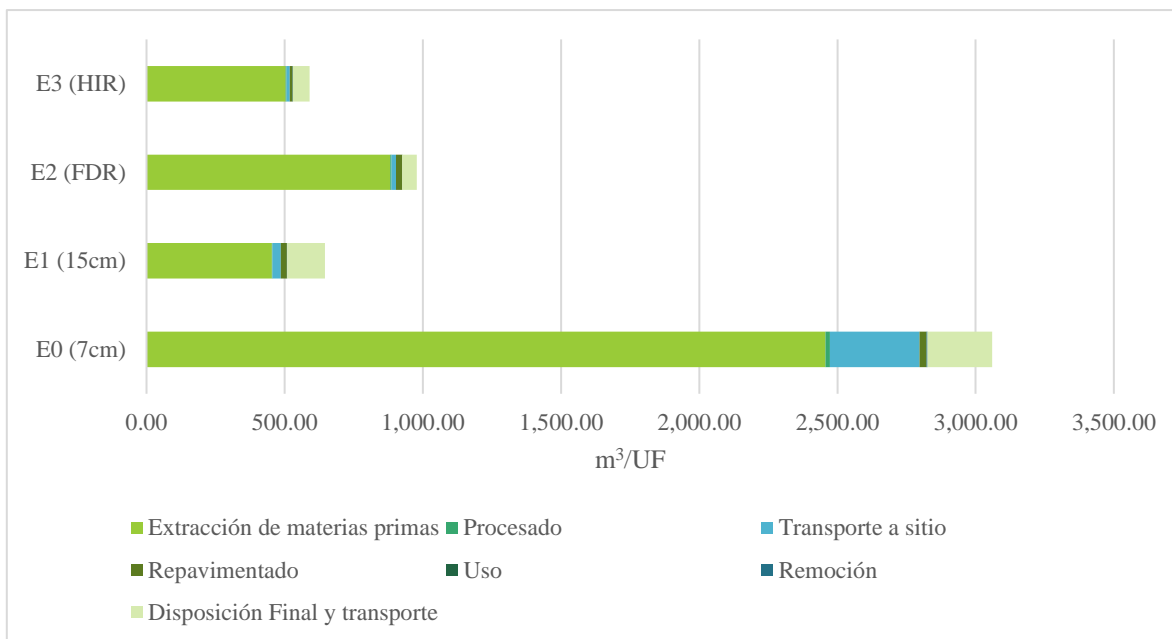


Figura 34. Contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos.

Tabla 37. Tabulación de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos, en m³

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	2,457	453	882	503
Procesado	15.57	2.86	4.67	3.34
Transporte a sitio	325	29.49	15.86	11.94
Tratamiento de rehabilitación	25.56	21.87	21.92	10.23
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	3.41	0.93	0.78	1.24
Disposición final y transporte	234	137	53.23	60.83
Total	3,060	645	978	590
Comparación porcentual	100%	21%	32%	19%

Tabla 38. Tabulación porcentual de contribución por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
Extracción de materias primas	80%	70%	90%	85%
Procesado	1%	0%	0%	1%
Transporte a sitio	11%	5%	2%	2%
Tratamiento de rehabilitación	1%	3%	2%	2%
Uso	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos	Sin impactos
Remoción	0%	0%	0%	0%
Disposición final y transporte	8%	21%	5%	10%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%

La Figura 34 muestra el gráfico de la contribución a la categoría de impacto de Agotamiento de Recursos Hídricos de las etapas de Ciclo de Vida de los diferentes escenarios analizados. En ella se puede apreciar que al igual que todas las otras categorías de impacto, el Escenario Base es el que tiene los mayores impactos, de los cuales la mayor contribución (80%, como se observa en la Tabla 38) proviene de la etapa de extracción de materias primas. Dentro de esta etapa se encuentran los procesos de producción de asfalto, con un impacto de 518.42 m³, y producción de grava, con un impacto de 1,938.93 m³. Al igual que en la categoría de impacto anterior, la producción de grava genera los mayores impactos para esta categoría. Esto corresponde a lo publicado por Mavis, 2003.

El Escenario 1 y el Escenario 3 generan impactos muy similares para esta categoría de impacto, la diferencia más grande entre los dos siendo el impacto por la etapa de disposición final y transporte: La etapa de disposición final del Escenario 3 es menor debido a la existencia de reciclaje in-situ. En cuanto al Escenario 1, la etapa cuyos impactos son mayores es la etapa de extracción de materias primas, siendo el proceso que contribuye más la producción de grava, con un impacto de 356.03 m³ de agua utilizados. Esto corresponde a lo mencionado por Mavis, 2003.

Para el Escenario 2, la etapa con mayor contribución a los impactos totales es la etapa de extracción de materias primas. Dentro de esta etapa, la producción de grava es la que genera los mayores impactos, usando 581.52 m^3 de agua, seguida por la producción de asfalto, que utiliza 236.25 m^3 y la producción de cal, que utiliza 64.16 m^3 de agua. Esto concuerda con Schlegel et al., (2016) y Mavis, (2003).

En el Escenario 3 también la etapa de extracción de materias primas (85%, como se observa en la Tabla 38) genera el mayor impacto en comparación con las otras etapas analizadas, en la cual la producción de grava utiliza 415.37 m^3 de agua, proceso que por sí solo equivale al 70.35% de los impactos totales de este Escenario.

Se puede observar que la producción de grava Impacta de gran manera los recursos hídricos del país, esto es probado en el estudio realizado por Mavis, 2003.

3.6 Análisis de sensibilidad

Como se menciona en los resultados discutidos anteriormente, de manera general existen dos grandes procesos que generan la mayor cantidad de los impactos para las categorías de impacto analizadas. Para los escenarios evaluados y las categorías de impacto, la etapa de extracción de materias primas genera un gran impacto por la producción de asfalto y por la producción de grava. De igual manera, la etapa de disposición final y transporte genera en muchos casos una gran contribución al impacto total de distintos escenarios. Para evaluar de manera particular los impactos causados por estos procesos se realiza un análisis de sensibilidad tomando en cuenta para cada uno de los escenarios del estudio la adición de una etapa de reciclaje parcial del material residual de carpeta fresada de manera que se pueda disminuir el impacto de las Etapas de Ciclo de Vida de extracción de materias primas y disposición final y transporte. El material reciclado va a ser utilizado como sustituto de grava, para lo cual tiene que ser transportado, triturado y procesado. No obstante, no es posible eliminar la etapa de disposición final y transporte debido al gran volumen de material residual de carpeta fresada producido. Debido a que es necesario diseñar la mezcla asfáltica de materiales a reciclar con los materiales vírgenes, lo cual queda del alcance de la tesis, se planteó la siguiente hipótesis. Para poder mantener una carpeta de rodamiento de una calidad equiparable a una hecha de materiales vírgenes, la inclusión de materiales reciclados no debe de ser mayor a 20% de la masa de grava utilizada en una mezcla asfáltica convencional (sin usar material reciclado). Por esta razón, para todos los escenarios se sigue tomando en cuenta la etapa de disposición final.

Por otro lado, es importante destacar el impacto que el Escenario 2 causa en la categoría de cambio climático, y el importante papel que juega la producción de cal en ello. Por esta razón, se realizó un segundo análisis de sensibilidad en el que se varía la cantidad de cal a utilizar en el Escenario 2, la cual corresponde al 4% de la masa de la capa estabilizada con el estabilizador. Para el análisis de sensibilidad se varía este porcentaje al 2% de la masa estabilizada y al 0%, es decir, sin uso de cal, para poder observar lo efectos que tendría el desarrollar tecnologías de reciclaje en frío sin la necesidad del uso de cal.

En la Figura 35 se puede observar la normalización de todos los escenarios y ambos análisis de sensibilidad para cada una de las categorías de impacto evaluadas. Esto se elabora de manera más específica en las secciones 3.6.1 Inclusión de reciclaje parcial en los escenarios y 3.6.2 Disminución de uso de cal en el Escenario 2. Los escenarios analizados son los siguientes:

1. Escenario Base: fresado parcial y reencarpetado (E0)
2. Escenario Base con reciclaje parcial (E0r)
3. Escenario 1: fresado total y reencarpetado (E1)
4. Escenario 1 con reciclaje parcial (E1r)
5. Escenario 2: Reciclaje en frío, Full Depth Reclamation (E2)
6. Escenario 2 utilizando 2% de cal (E2 2%)
7. Escenario 2 utilizando 0% de cal (E2 0%)
8. Escenario 2 con reciclaje parcial (E2r)
9. Escenario 3: Reciclaje en caliente, Hot In-place Recycling (E3)
10. Escenario 3 con reciclaje parcial (E3r)

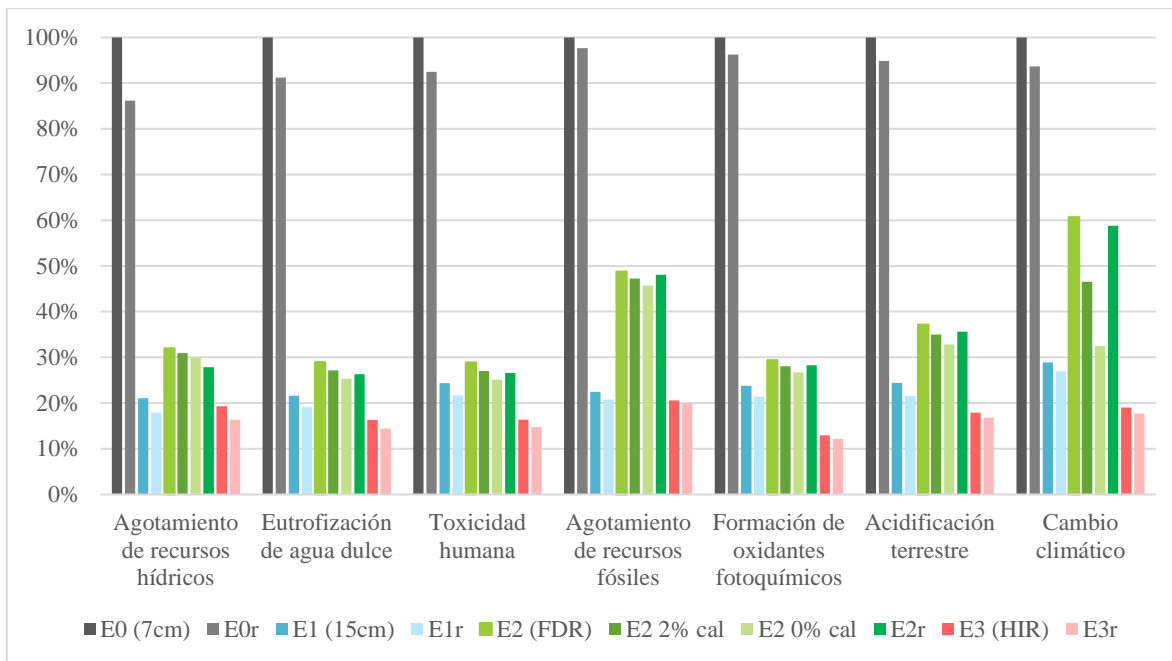


Figura 35. Impacto ambiental total normalizado de todos los escenarios y análisis de sensibilidad por categoría de impacto.

3.6.1 Inclusión de reciclaje parcial en los escenarios

En la Figura 36 se puede apreciar la normalización de resultados para cada una de las categorías de impacto del estudio. Es clara la diferencia que presentan los escenarios de Sensibilidad con sus contrapartes a las que les falta el reciclaje parcial. En la Tabla 39 se denota que los mayores ahorros generados gracias a la incorporación de reciclaje parcial fueron: para el Escenario Base con reciclaje parcial, el Agotamiento de recursos hídricos con una diferencia del 14%; para el Escenario 1 con reciclaje parcial, las categorías de Agotamiento de Recursos Hídricos, Eutrofización de Agua Dulce y toxicidad humana, con una diferencia del 3%; para el Escenario 2 con reciclaje parcial, la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos, con una diferencia del 4% y para el Escenario 3 con reciclaje parcial, la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos con una diferencia del 3%.

Cabe notar que las diferencias más pronunciadas para este análisis de sensibilidad son las que se presentan entre el Escenario Base y el Escenario Base con reciclaje parcial, esto debido a la gran cantidad de volumen de carpeta reemplazada que requiere este escenario a lo largo del período de estudio de 30 años.

En la Tabla 40 se observa que en cuanto a las Etapas de Ciclo de Vida, las que se ven beneficiadas con los mayores ahorros en general son: extracción de materias primas, remoción y disposición final y transporte, lo que es de esperarse tomando en cuenta los

cambios antes mencionados que implican la adición de reciclaje parcial a los cuatro escenarios.

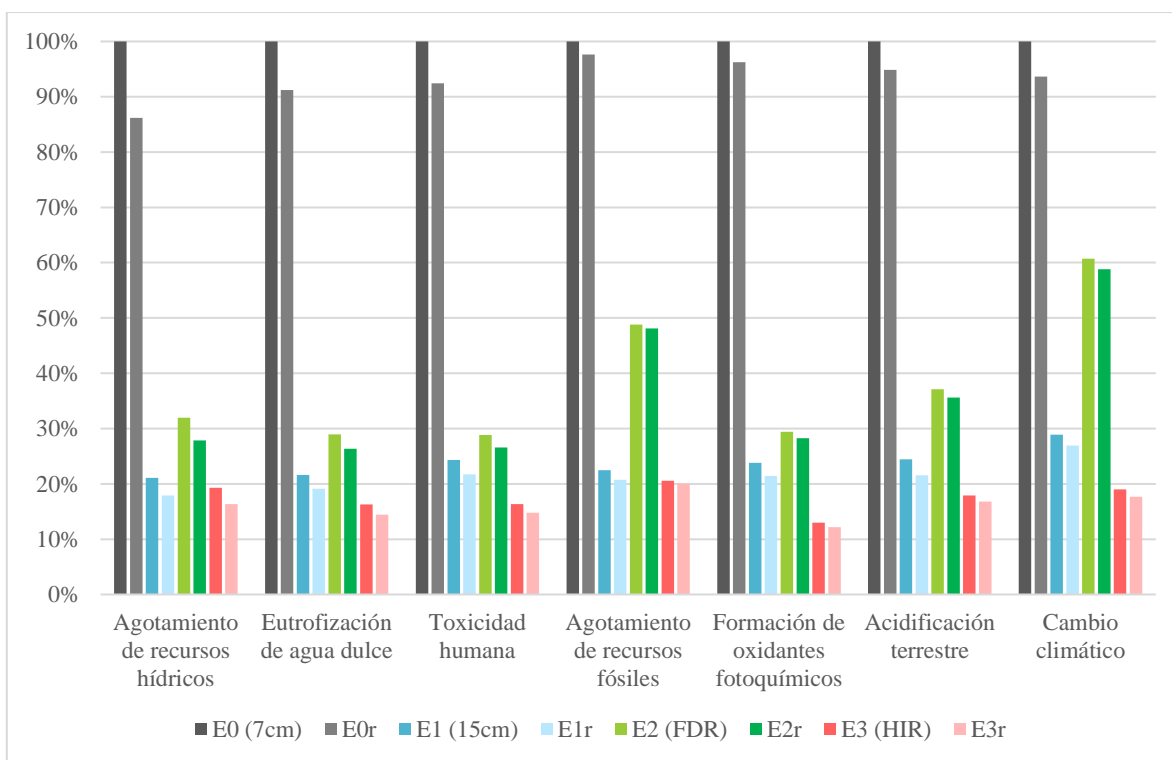


Figura 36. Normalización de escenarios y análisis de sensibilidad por reciclaje parcial.

Tabla 39. Decrementos porcentuales de escenarios por categoría de impacto para análisis de sensibilidad por reciclaje parcial

Categoría de impacto	E0	E0r	E1	E1r	E2	E2r	E3	E3r
Agotamiento de recursos hídricos	0%	-14%	-79%	-82%	-68%	-72%	-81%	-84%
Eutrofización de agua dulce	0%	-9%	-78%	-81%	-71%	-74%	-84%	-86%
Toxicidad humana	0%	-8%	-76%	-78%	-71%	-73%	-84%	-85%
Agotamiento de recursos fósiles	0%	-2%	-78%	-79%	-51%	-52%	-79%	-80%
Formación de oxidantes fotoquímicos	0%	-4%	-76%	-79%	-71%	-72%	-87%	-88%
Acidificación terrestre	0%	-5%	-76%	-78%	-63%	-64%	-82%	-83%
Cambio climático	0%	-6%	-71%	-73%	-39%	-41%	-81%	-82%

Tabla 40. Decrementos porcentuales promedio de escenarios por Etapa de Ciclo de Vida impacto para análisis de sensibilidad por reciclaje parcial

Etapa de Ciclo de Vida	E0	E0r	E1	E1r	E2	E2r	E3	E3r
Extracción de materias primas	0%	-14%	-79%	-82%	-68%	-72%	-81%	-84%
Procesado	0%	-9%	-78%	-81%	-71%	-74%	-84%	-86%
Transporte a sitio	0%	-8%	-76%	-78%	-71%	-73%	-84%	-85%
Tratamiento de rehabilitación	0%	-6%	-75%	-78%	-67%	-68%	-83%	-84%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	-12%	-62%	-67%	-72%	-75%	-79%	-81%
Disposición final y transporte	0%	-13%	-65%	-70%	-69%	-73%	-79%	-82%

S/I: Sin Impactos

3.6.2 Disminución de uso de cal en el Escenario 2

Se puede observar en la Figura 37 que al disminuir el uso de cal en el Escenario 2, disminuyen los impactos para todas las categorías de impacto sobre todo para cambio climático. Es aquí en donde podemos apreciar la mayor disminución de impactos, bajando del 61% (comparado con el impacto generado por el Escenario Base) a tan sólo el 32%, lo que significa una diferencia del 28%, como se puede apreciar en la Tabla 41.

En cuanto a las etapas de Ciclo de Vida, en la

Tabla 42 se aprecia que la mayor diferencia entre el Escenario 2 y el Escenario 2 sin cal se encuentra en el tratamiento de rehabilitación, con una diferencia del 5%, aunque también se aprecian diferencias del 4% en las etapas de procesado de materias primas y transporte a sitio.

En Schlegel et al., 2016, destacan la diferencia en cuanto al tiempo de vida útil, cuando se usa cal en un sistema de pavimentación que consiste en el uso de cal en la etapa de pavimentación (Escenario Base). Ellos consideran que el agregar cal aumenta la vida útil y con ellos se logran disminuir impactos ambientales (aunque la producción de cal sigue estando entre los principales impactos hacia cambio climático). Lo anterior no fue considerado como parte de este estudio, por lo cual se recomienda analizar en futuras investigaciones el tiempo de vida útil real con y sin uso de cal en el proceso de alternativas de rehabilitación.

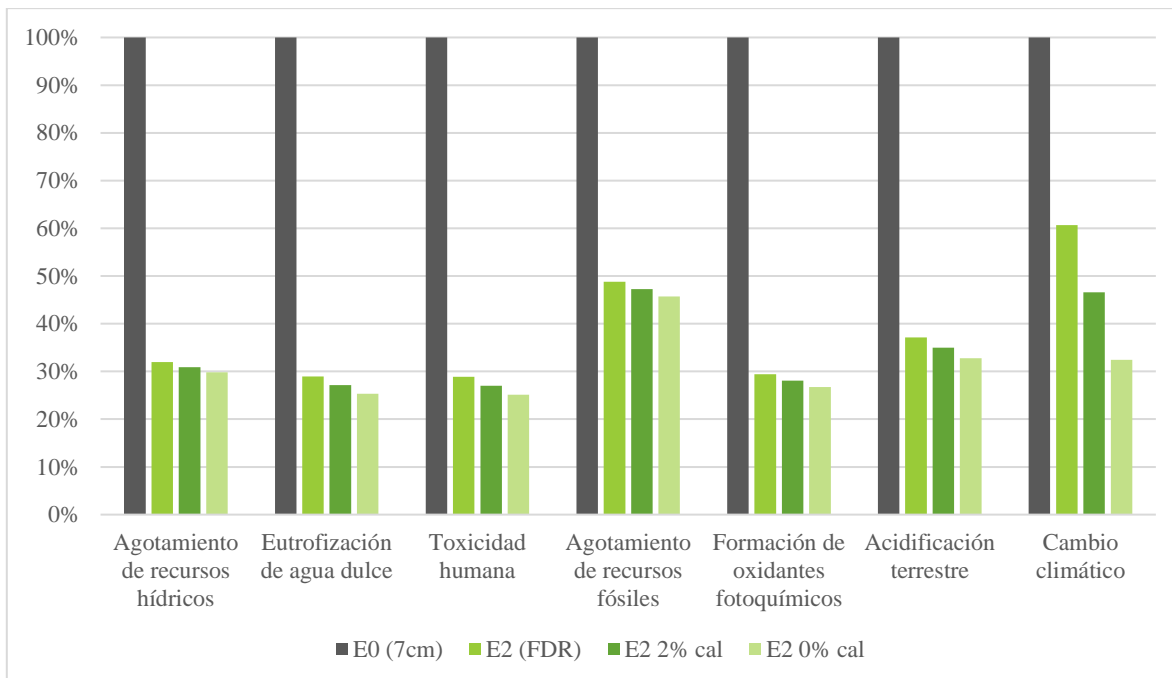


Figura 37. Normalización de escenarios y análisis de sensibilidad por uso de cal.

Tabla 41. Decrementos porcentuales de escenarios por categoría de impacto para análisis de sensibilidad por uso de cal

categoría de impacto	E0	E2 (4%)	E2 (2%)	E2 (0%)
Agotamiento de recursos hídricos	0%	-68%	-69%	-70%
Eutrofización de agua dulce	0%	-71%	-73%	-75%
Toxicidad humana	0%	-71%	-73%	-75%
Agotamiento de recursos fósiles	0%	-51%	-53%	-54%
Formación de oxidantes fotoquímicos	0%	-71%	-72%	-73%
Acidificación terrestre	0%	-63%	-65%	-67%
Cambio climático	0%	-39%	-53%	-68%

Tabla 42. Decrementos porcentuales promedio de escenarios por Etapa de Ciclo de Vida impacto para análisis de sensibilidad por uso de cal

Etapa de Ciclo de Vida	E0	E2 (4%)	E2 (2%)	E2 (0%)
Extracción de materias primas	0%	-68%	-69%	-70%
Procesado	0%	-71%	-73%	-75%
Transporte a sitio	0%	-71%	-73%	-75%
Tratamiento de rehabilitación	0%	-67%	-69%	-72%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	-72%	-72%	-73%
Disposición final y transporte	0%	-69%	-71%	-73%

CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA

El objetivo del ACCV (Económico) es complementar el ACV (Ambiental), poniendo en perspectiva las diferencias en costos que existen entre el Escenario Base y los tres escenarios a propuestos, haciendo énfasis en los potenciales ahorros generados a largo plazo, específicamente al término del período de estudio de 30 años. Esto tiene el propósito de generar información que ayude a tomar decisiones a nivel gubernamental de una manera holística y sistemática.

El ACCV se lleva a cabo siguiendo la metodología descrita por la Alianza de Pavimentos Asfálticos (APA: Asphalt Pavement Alliance). Esta metodología consta en el cálculo y localización temporal de los costos del ciclo de vida de la carretera y convertir los valores monetarios futuros a VPN, aplicándoles un valor de descuento dependiente de la tasa de inflación anual prevista y también de la tasa de interés (APA, 2011). En las referencias consultadas, se muestra como la representación gráfica de la Figura 38.

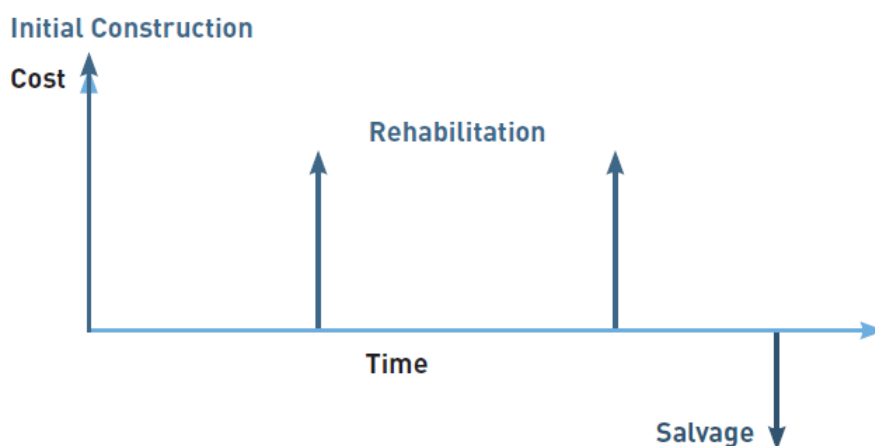


Figura 38. Representación gráfica del método de Análisis de Costos de Ciclo de Vida por medio de VPN (APA,2011).

4.1 Costo inicial

Para la cuantificación de los costos de los distintos escenarios se utilizó el Tabulador de precios referenciales a costo directo para la construcción, modernización y conservación de obras de infraestructura, publicado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en 2019. Este documento se actualiza anualmente y tiene “la finalidad de contar con una herramienta que permita integrar los presupuestos de referencia de las obras que incluyan infraestructura carretera y determinar el pago de obras por asignación directa” (SCT, 2019).

Cabe destacar que dentro de los costos analizados no se toma en cuenta la inversión inicial por la compra o la renta de los distintos equipos especializados.

Las tablas presentadas a continuación toman en cuenta el costo referenciado a un proceso de rehabilitación de 1 km-carril, por lo que más adelante serán multiplicados por el número de rehabilitaciones dentro del período de estudio de 30 años para que de ese modo los costos también estén referenciados a la Unidad Funcional descrita en la sección 3.1.3 Unidad Funcional.

Tabla 43. Costos por rehabilitación del Escenario 0: Fresado parcial y reencarpetao.

Escenario 0. Fresado parcial y reencarpetao					
Concepto	Unidad	Costo unitario	Línea de referencia¹	Cantidad /rehab.	Costo /rehab.
“Fresado de carpeta de concreto asfáltico con maquina perfiladora, por unidad de obra terminada”	m3	\$146.23	5309	245	\$35,826.35
“Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, por unidad de obra terminada”	m2	\$14.87	2984	3500	\$52,045.00
“Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme a lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, por unidad de obra terminada”	m3	\$2,452.24	2994	245	\$600,798.80
Total, por proceso de rehabilitación					\$688,798.80

¹ Tabulador de precios referenciales a costo directo para la construcción, modernización y conservación de obras de infraestructura, publicado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en 2019

Tabla 44. Costos por rehabilitación de Escenario 1: Fresado total y reencarpetao.

Escenario 1. Fresado total y reencarpetao					
Concepto	Unidad	Costo unitario	Línea de referencia	Cantidad /rehab.	Costo /rehab.
“Fresado de carpeta de concreto asfáltico con maquina perfiladora, por unidad de obra terminada”	m3	\$146.23	5309	525	\$76,770.75
“Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, por unidad de obra terminada”	m2	\$14.87	2984	3500	\$52,045.00
“Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme a lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, por unidad de obra terminada”	m3	\$2,452.24	2994	525	\$1,287,426.00
Total, por proceso de rehabilitación					\$1,416,241.75

Tabla 45. Costos por rehabilitación de Escenario 2: Reciclaje en frío.

Escenario 2. Reciclaje en frío (FDR)					
Concepto	Unidad	Costo unitario	Línea de referencia	Cantidad /rehab.	Costo /rehab.
“Fresado de carpeta de concreto asfáltico con maquina perfiladora, por unidad de obra terminada”	m3	\$146.23	5309	245	\$35,826.35

“Revestimiento con materiales procedentes de bancos estabilizados con cal hidratada por unidad de obra terminada. Incluye: carga de material a unidades de transporte”	m3	\$647.77	2922	42	\$27,206.34
“Recuperación en frío de pavimentos asfálticos, conforme a lo indicado en el proyecto, por unidad de obra terminada”	m3	\$1,375.18	5864	1050	\$1,443,939.00
“Riego asfáltico de liga con emulsión de rompimiento rápido, por unidad de obra terminada”	m2	\$14.87	2984	3500	\$52,045.00
“Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme a lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, por unidad de obra terminada”	m3	\$2,452.24	2994	245	\$600,798.80
Total, por proceso de rehabilitación					\$2,159,815.49

Tabla 46. Costos por rehabilitación de Escenario 3: Reciclaje en caliente.

Escenario 3. Reciclaje en caliente (HIR)					
Concepto	Unidad	Costo unitario	Línea de referencia	Cantidad /rehab.	Costo /rehab.
“Fresado de pavimento de concreto asfáltico con maquina perfiladora, por unidad de obra terminada”	m3	\$146.23	5309	175	\$25,590.25

“Recuperación en caliente de carpetas asfálticas, por unidad de obra determinada”	m3	\$911.71	5329	175	\$159,549.25
“Carpeta asfáltica con mezcla en caliente de granulometría densa con materiales procedentes de bancos que elija el contratista, compactada al 95% conforme a lo indicado en el proyecto, con cemento asfáltico AC-20, por unidad de obra terminada”	m3	\$2,452.24	2994	175	\$429,142.00
Total, por proceso de rehabilitación					\$614,281.50

4.2 Vida útil estimada

La vida útil de los escenarios propuestos en esta sección son los mismos utilizados en la sección de ACV ambiental. En la sección 3.2 Descripción y límites de los sistemas, se definieron las respectivas vidas útiles de los escenarios con respecto a la profundidad de rehabilitación. Dichas vidas útiles son:

- Escenario 0. Fresado parcial y reencarpetado: 3 años.
- Escenario 1. Fresado total y reencarpetado: 15 años.
- Escenario 2. Reciclaje en frío (FDR): 20 años.
- Escenario 3. Reciclaje en caliente (HIR): 10 años.

4.3 Costos mantenimiento

Ya que para esta tesis se están comparando cuatro tratamientos de rehabilitación, los costos de la etapa de mantenimiento son equivalentes a los costos iniciales, los cuales se desglosan anteriormente y son:

- Escenario 0. Fresado parcial y reencarpetado: \$688,670.15/rehabilitación.
- Escenario 1. Fresado total y reencarpetado: \$1,416,241.75/rehabilitación.
- Escenario 2. Reciclaje en frío (FDR): \$2,159,815.49/rehabilitación.
- Escenario 3. Reciclaje en caliente (HIR): \$614,281.50/rehabilitación

4.4 Valor de rescate

El valor de rescate se refiere a la vida útil que todavía le queda a una alternativa, una vez terminado el período de estudio. En el caso de este análisis, el período de estudio es de 30 años, al término de los cuales los escenarios todavía tienen el siguiente porcentaje de vida útil restante:

- Escenario 0. Fresado parcial y reencarpetado: 0%.
- Escenario 1. Fresado total y reencarpetado: 0%.
- Escenario 2. Reciclaje en frío (FDR): 50%.
- Escenario 3. Reciclaje en caliente (HIR): 0%.

4.5 Tasa de descuento

La tasa de descuento, como se describe anteriormente está relacionada con la tasa de inflación país y la tasa de interés del país. Dado que estas variables siempre están en constante variación, es necesario realizar un análisis histórico para elegir un valor racional de la tasa de descuento. El cálculo de la tasa de descuento se realiza con la siguiente fórmula

$$d = \frac{i - f}{1 + i}$$

Donde:

i: tasa de inflación

t: tasa de interés

La Figura 39 muestra las fluctuaciones de la inflación y la tasa de interés en México desde 2000 hasta 2020 (Banxico, 2020), año en el cual podemos observar una caída en la tasa de interés, medida tomada para propiciar el consumo a partir de la situación económica de este año. En la Figura 40 se suavizan las variaciones de la tasa de interés con una media móvil a dos años, y se puede observar que el valor último de la tasa de descuento a diciembre de 2020 es de 3.38%. La Alianza de Pavimentos Asfálticos de Estados Unidos recomienda utilizar una tasa de descuento del 4%, valor que utilizan 23 de los 50 estados de ese país para sus ACCV (APA, 2011). Tomando en cuenta la recomendación de APA y los resultados obtenidos del cálculo de la tasa de descuento (que se asemejan a la recomendación), se toma la decisión de tomar una tasa de descuento del 4% para esta tesis.

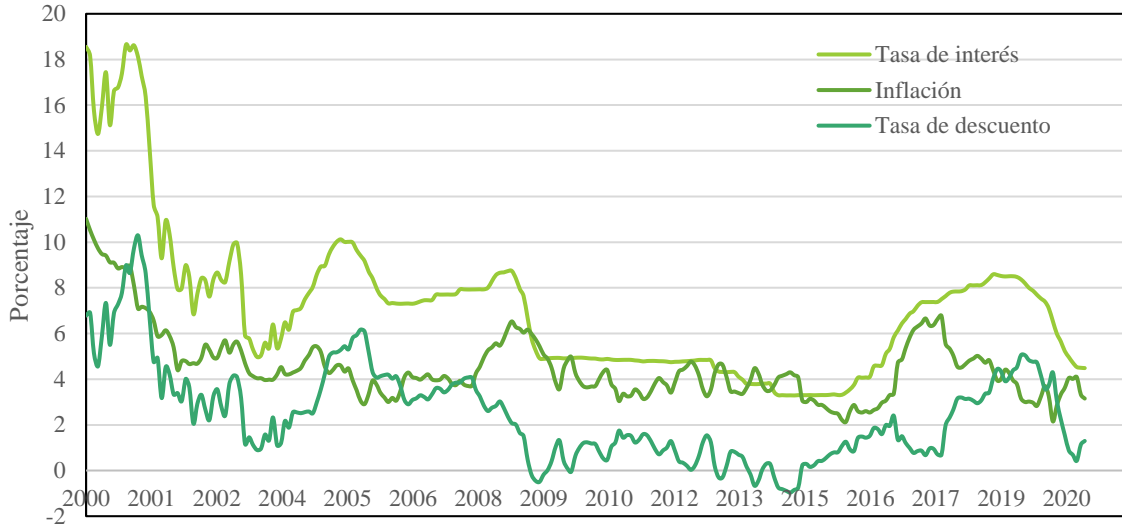


Figura 39. Cálculo de la tasa de descuento a partir de la tasa de inflación y la tasa de interés de los últimos 20 años.

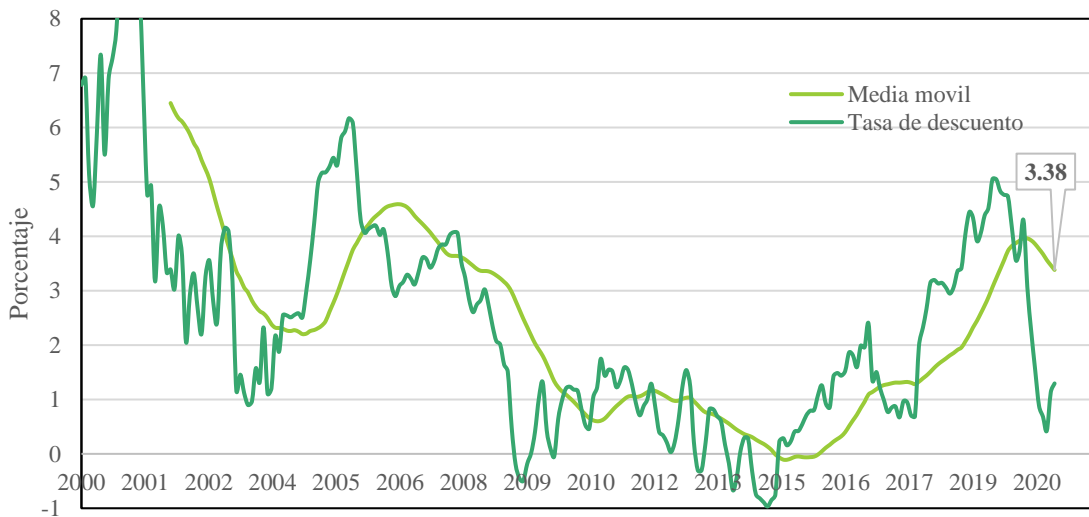


Figura 40. Suavización de la curva con media móvil a dos años.

4.6 Resultados: Evaluación de Costos de Ciclo de Vida

Previamente se explica la obtención de los valores de Costo Inicial, Vida Útil estimada, Costos de Mantenimiento, Valor de Rescate y Tasa de Descuento, lo que se resume por escenario en la Tabla 47.

Tabla 47. Resumen de datos para la utilización del método de Valor Presente Neto (VPN)

Escenario	Unidad	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en
-----------	--------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------	------------------

					caliente (HIR)
Costo Inicial	MX\$	688,670.15	1,416,241.75	2,159,815.49	614,281.50
Vida útil estimada	Años	3	15	20	10
Costos de procesos de tratamiento subsecuentes	MX\$	688,670.15	1,416,241.75	2,159,815.49	614,281.50
Valor de rescate	%	0	0	50	0
Valor de rescate	MX\$	0	0	1,079,907.75	0
Tasa de descuento	%	4	4	4	4

Para la utilización del método de VPN es necesaria la colocación de cada costo de proceso de tratamiento en una línea temporal. Para traer los costos futuros a VPN, los costos en años futuros se afectan por la tasa de descuento de la manera siguiente:

$$VPN = \frac{VP}{(1 + T_d)^t}$$

Donde:

- VPN: Costo a Valor Presente Neto, en MX\$.
- VP: Valor Presente de Costos de Mantenimiento, en MX\$.
- Td: Tasa de descuento anual expresada, en decimal.
- t: Años transcurridos entre el año inicial y el año en el que se generan los costos, en años.

Por lo tanto, tabulando los años del período de estudio de 30 años y posicionando temporalmente los costos a VPN, se obtienen los resultados mostrados en la

Tabla 48. Cabe notar la presencia de un costo negativo al final del período de estudio para el Escenario 2, esto es debido al valor de rescate, que representa a la vida útil restante de dicha alternativa al término de los 30 años.

Tabla 48. Ubicación temporal de costos a VPN

Año	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E1. Fresado total y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E3. Reciclaje en caliente (HIR)
2020	\$688,670.15	\$1,416,241.75	\$2,159,815.49	\$614,281.50
2021				
2022				
2023	\$612,225.26			
2024				
2025				
2026	\$544,266.02			
2027				
2028				
2029	\$483,850.51			
2030				\$414,986.57
2031				
2032	\$430,141.34			
2033				
2034				
2035	\$382,394.09	\$786,388.77		
2036				
2037				
2038	\$339,946.95			
2039				
2040			\$985,711.60	\$280,350.06
2041	\$302,211.60			
2042				
2043				
2044	\$268,665.01			
2045				
2046				
2047	\$238,842.22			
2048				
2049				
2050			-\$332,955.72	
Σ	\$4,291,213.16	\$2,202,630.52	\$2,812,571.37	\$1,309,618.13

Como se puede observar, al Término del Período de estudio de 30 años, el escenario cuyos costos totales son mayores es el Escenario Base (Fresado parcial y reencarpetao), con un costo total de **MX\$4,291,213.16** por km-carril. El escenario más económico es el Escenario 3 (reciclado en caliente), con un costo total de **MX\$1,309,618.13** por km-carril. Estos resultados concuerdan con el comportamiento observado en el ACV Ambiental.

Gráficamente, se representan los costos de los cuatro escenarios desde la Figura 41 a la Figura 45.

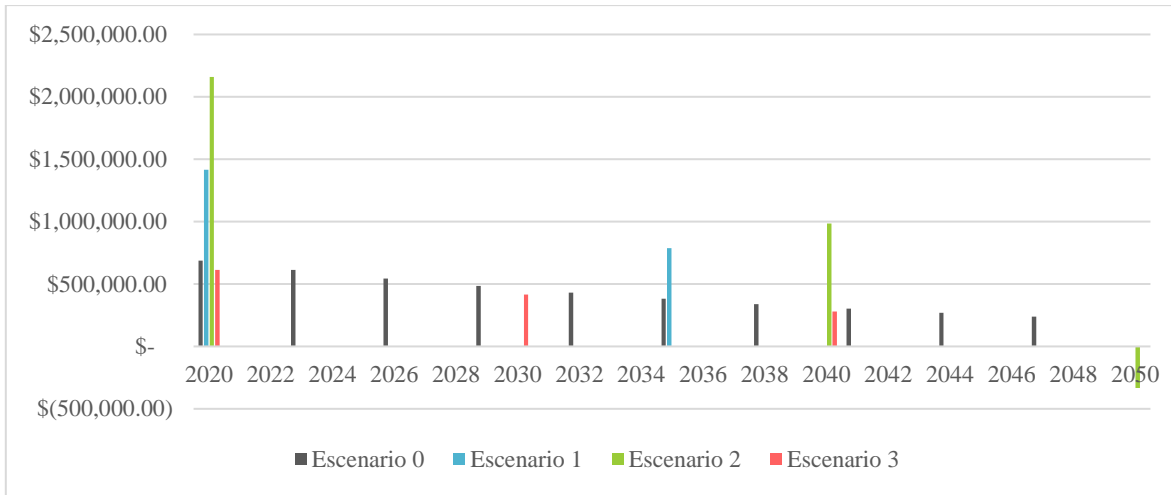


Figura 41. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN general.

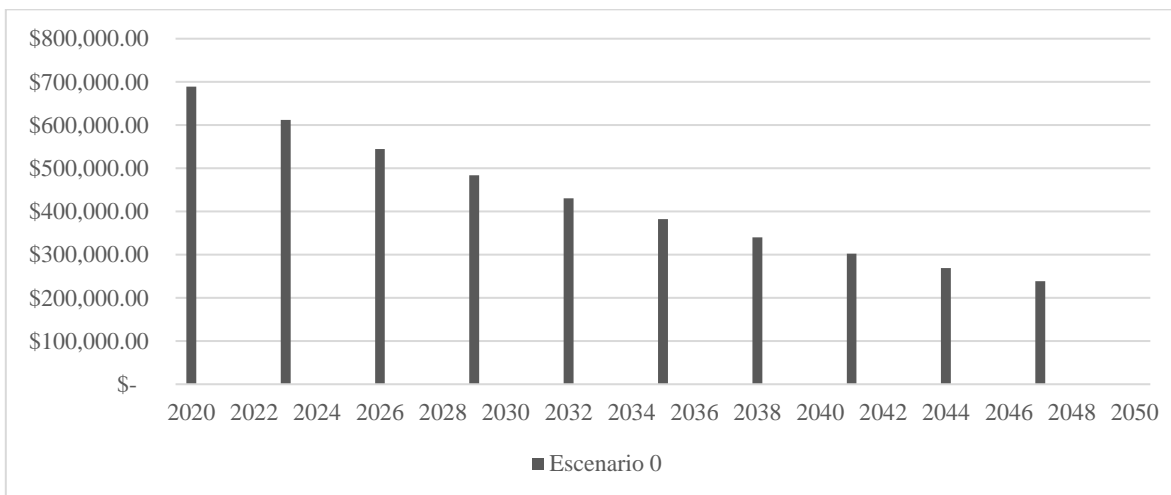


Figura 42. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario Base: fresado parcial y reencarpetado.

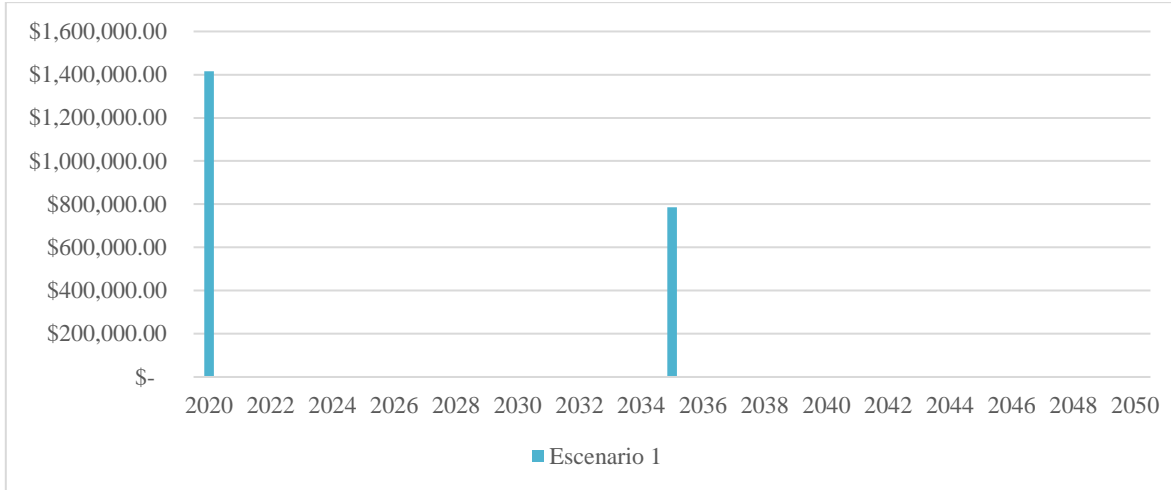


Figura 43. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario 1: fresado total y reencarpetao.

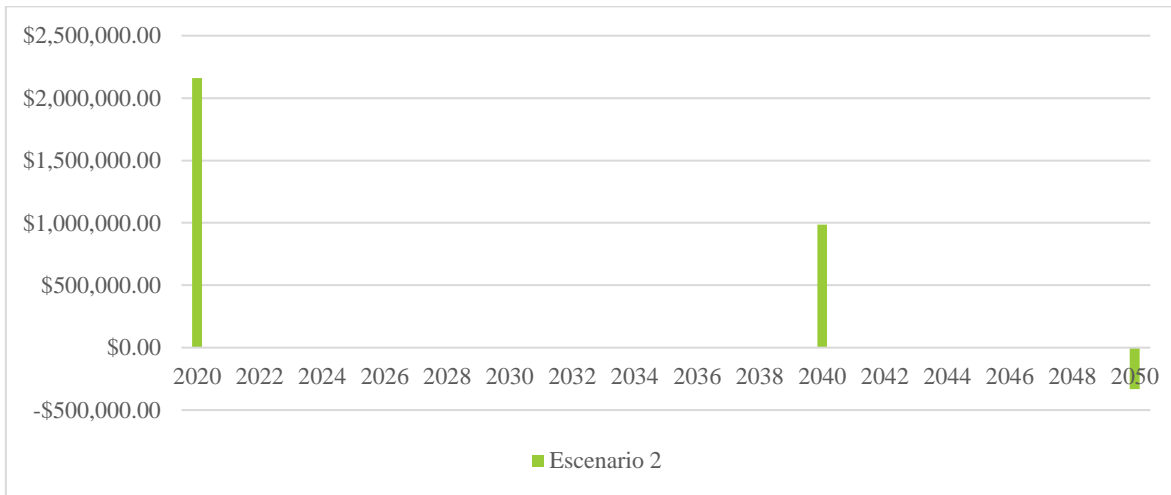


Figura 44. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario 2: reciclaje en frío (FDR).

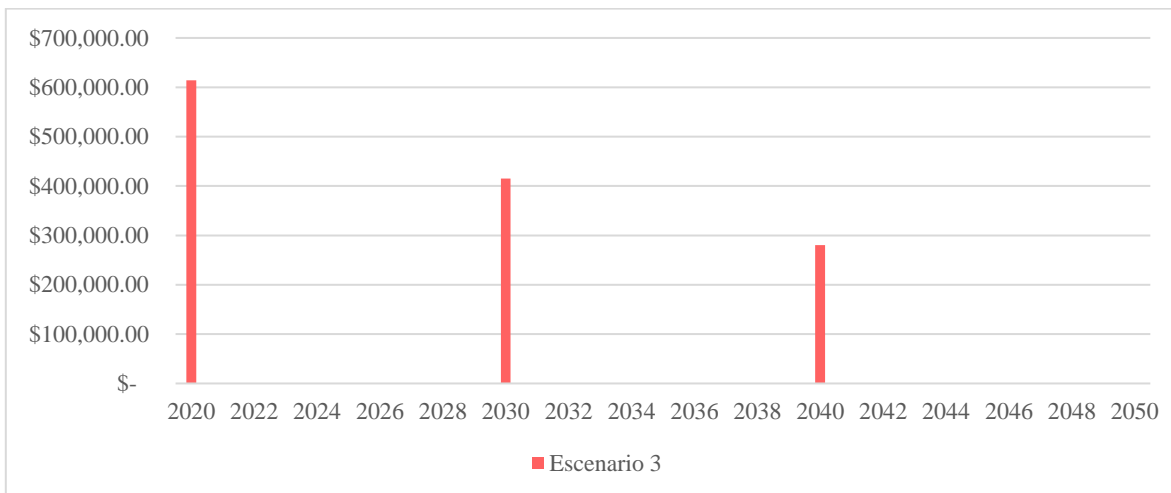


Figura 45. Análisis de Costos de Ciclo de Vida a VPN, Escenario 3: reciclaje en caliente (HIR).

4.7 Interpretación

En la Figura 46 se representan los costos acumulados del Ciclo de Vida de los cuatro escenarios analizados. Se aprecia que, a largo plazo, al término de los 30 años el escenario más costoso es el Escenario Base, con un costo total de MX\$4,291,213.16 por km-carril, seguido del Escenario 2, que considerando el valor de rescate al final del período de estudio tiene un costo total de MX\$2,812,571.37 por km-carril. El Escenario 1 tiene un costo total de MX\$2,202,630.52 por km-carril y el escenario más económico es el Escenario 3, el cual tiene un costo total de MX\$1,309,618.13 por km-carril al final de los 30 años. Es decir, tomando el costo del Escenario Base como referencia, el Escenario 2 es 34% más bajo, el Escenario 1 es 48% más económico y el Escenario 3 es 69% más bajo.

Es importante recalcar que; a corto plazo, el Escenario Base se encuentra entre los más económicos, y considerando que para el Análisis de Costos de Ciclo de Vida no se tomaron en cuenta las inversiones iniciales por la compra o renta de los equipos especializados, tiene mucho sentido y concuerda que sea el escenario de elección para darle una corta vida útil a las vialidades principales de la Ciudad. En el Capítulo 5 se discutirá más a fondo sobre la razón de la preferencia por parte del gobierno por el tratamiento de rehabilitación de pavimentos representados por el Escenario 0, que claramente es el que menos conviene a largo plazo, pero de los que más convienen a corto plazo.

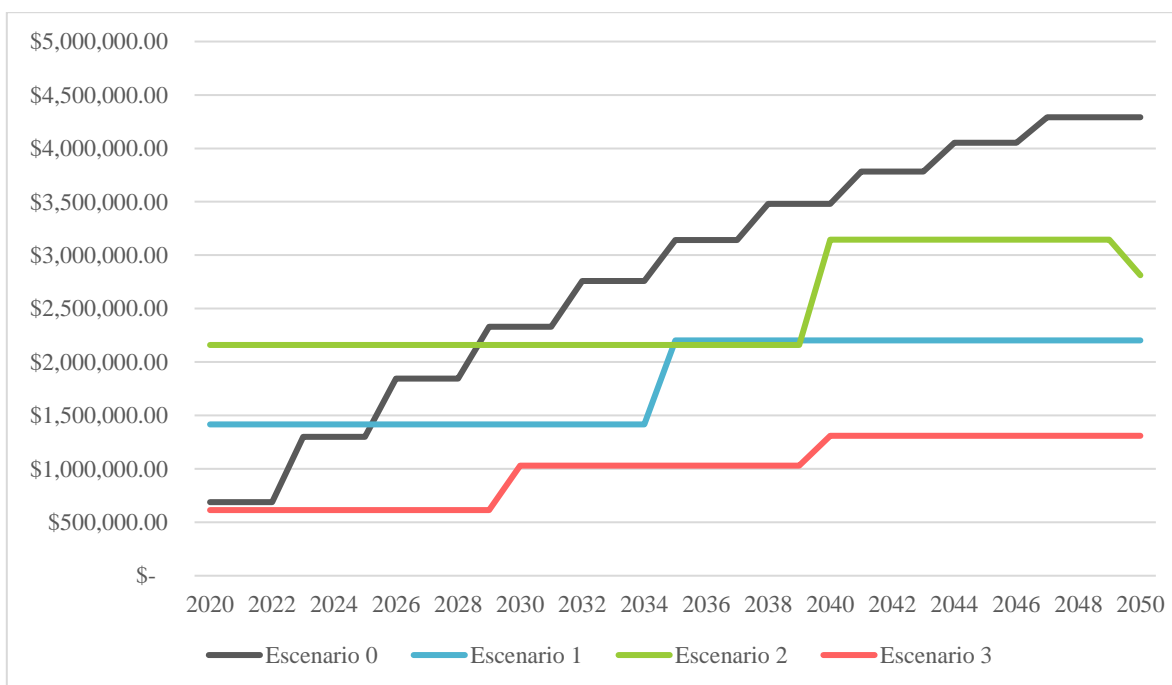


Figura 46. Inversión monetaria acumulada a VPN para el Ciclo de Vida de los cuatro escenarios en el período de Estudio de 30 años, en MX\$.

CAPÍTULO 5 : CONCLUSIONES

Los resultados del ACV Ambiental permiten la comparación de los distintos escenarios evaluados y determinar cuál es el más conveniente dependiendo de su desempeño ambiental en las categorías impacto evaluadas

El escenario con el peor desempeño ambiental es el Escenario Base, generando los mayores impactos en las 7 categorías de impacto evaluadas: cambio climático, acidificación terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos, agotamiento de recursos fósiles, toxicidad humana, eutrofización de agua dulce y agotamiento de recursos hídricos. Dentro de este escenario, la etapa de Ciclo de Vida que genera los mayores impactos es la extracción de materias primas, debido al gran volumen de concreto asfáltico que se tiene que reemplazar en el período de estudio de 30 años.

El escenario con el mejor desempeño ambiental es el Escenario 3, teniendo los menores impactos en las 7 categorías de impacto evaluadas. Estos resultados provienen de la capacidad del equipo Remixer de realizar las labores que en otros escenarios requieren de un grupo más numeroso de unidades. Por otro lado, la extracción de materias primas por parte de este tratamiento de rehabilitación de pavimentos es reducida gracias a la reutilización y rejuvenecimiento de una parte de la carpeta asfáltica antigua.

En cuanto al análisis de sensibilidad, la implementación de reciclaje parcial del material residual de carpeta asfáltica fresada y su reintroducción dentro del sistema como sustituto de agregado mineral mejora el desempeño ambiental de todos los escenarios de manera considerable, sobre todo en el caso del Escenario Base, pero esta modificación del escenario no es suficiente para disminuir los impactos para que su desempeño esté a la par con cualquier otro de los 3 escenarios propuestos, por lo que sigue siendo la opción menos conveniente.

En cuanto al Escenario 2, la utilización de una gran cantidad de maquinaria, aunado a la producción de agregado mineral y de asfalto presente en la etapa de extracción de materias primas afecta su desempeño ambiental. Al realizar el análisis de sensibilidad y disminuir la cantidad de cal requerida para el Escenario 2 es muy notable la disminución de impacto para la categoría de cambio climático, lo que denota un muy grande impacto debido a la extracción, procesado y producción de cal en forma de emisiones de CO₂ equivalente.

Las etapas de Ciclo de Vida también se desglosan en el ACV con la finalidad de identificar origen de las contribuciones más grandes al impacto total de cada escenario analizado. Para la mayor parte de categorías de impacto y en el caso de todos los escenarios, la etapa que más contribuye es la de extracción de materias primas, esto debido a que para la producción de

asfalto se necesita la extracción y refinación de petróleo. Contribuyendo a la misma etapa están los procesos de producción de grava (el cual genera impactos importantes en las categorías de Eutrofización de Agua Dulce y al Agotamiento de recursos hídricos) y la producción de cal, específicamente contaminante en el Escenario 2 para la categoría de impacto de cambio climático.

Debido a los resultados obtenidos, la hipótesis planteada es aceptada parcialmente ya que todos los escenarios propuestos logran un mejor desempeño ambiental pero no todos logran un mejor desempeño económico a largo plazo.

Los escenarios alternativos que se propusieron generan menores impactos ambientales que el Escenario Base, pero la adaptación del método de reciclaje en frío por medio de estabilización de base o Full Depth Reclamation (FDR) genera más impactos ambientales que el Escenario 1, el cual consta en un fresado total de la carpeta antigua y un reencarpetao con la suficiente calidad de materiales y proceso constructivo como para aumentar de manera significativa su vida útil. Esto quiere que el correcto empleo de tecnologías actuales puede llegar a generar menores impactos ambientales que la incorporación de algunas de las tecnologías nuevas.

En cuanto a la parte económica planteada en la hipótesis, ésta se acepta parcialmente debido al alto costo del Escenario 2, en comparación con el Escenario 1.

Cabe recalcar el uso de datos teóricos, por lo que en la sección 5.1 Recomendaciones y futuras líneas de estudio, se explica cómo se podría mejorar la calidad y confiabilidad de los datos al aplicarse este estudio a un proyecto real. No obstante, se observa claramente que, para la categoría de Cambio Climático, las emisiones de gases de efecto invernadero del Escenario 2: reciclaje en frío son más que el doble que las emisiones generadas por el Escenario 3: reciclaje en caliente. Esto concuerda precisamente con Ma et al., (2020), quienes al igual que en esta tesis consideraron una capa extra de pavimento asfáltico y declaran que “para obtener los mismos requerimientos de rendimiento estructural para pavimento de carretera, el reciclaje en frío con una capa extra de carpeta asfáltica genera más que el doble de emisiones de gases de efecto invernadero que el reciclaje en caliente”. Dentro de los escenarios de reciclaje en frío contemplados en el artículo, la etapa con las mayores emisiones de gases de efecto invernadero fue la de extracción de materias primas,

En cuanto al desempeño económico de los distintos escenarios se observa una compatibilidad con el comportamiento observado en la parte Ambiental del ACV. Esto nos indica la relevancia que tiene el evitar tratamientos de rehabilitación con métodos que tengan

desempeño sólo a corto plazo. Es primordial la inversión de más capital para el alargamiento de la vida útil del pavimento, de esta manera el costo a largo plazo se disminuye de manera importante. Ya que el mantenimiento de carreteras y caminos es una labor que le pertenece al gobierno, y como se denota en el Capítulo 4 tiene mucha lógica que los gobernantes prefieran utilizar las alternativas más económicas, ya que para el período de un sexenio todavía no se notan los ahorros generados a largo plazo por la implementación de cualquiera de los escenarios propuestos. Es decir, los tomadores de decisiones deben evitar la búsqueda del ahorro y de la gratificación política a corto plazo, viendo sólo por el bien de su administración, ya que al ampliar la perspectiva de los estudios Ambientales y Económicos fuera de un sexenio (como se propone en esta tesis, en la que se tomó un período de estudio de 30 años) los resultados descubren un bajo desempeño Ambiental y Económico de las soluciones a corto plazo.

5.1 Recomendaciones y futuras líneas de estudio

Debido a los alcances de esta tesis y a las restricciones producidas a raíz de la Pandemia del virus COVID-19, a lo largo de este escrito se realizaron distintas estimaciones (sobre todo en los casos del Escenario 2 y el Escenario 3, ya que no existen registros oficiales del uso de estas tecnologías en México) que fueron necesarias para llevar a cabo la modelación de los escenarios en el software de ACV, Umberto. Los siguientes puntos describen las recomendaciones y las futuras líneas de estudio que se podrían realizar tomando como base los resultados y datos obtenidos en el presente documento.

- Las cantidades descritas en el Capítulo 3 para el inventario fueron extraídas de un gran número de fuentes de distintas épocas y distintas empresas, por lo que se recomienda la revisión y comparación de los datos del inventario con datos de proyectos reales en los que se utilicen las tecnologías y maquinaria mencionada, la cual no cuenta con un uso regular en México.
- Las Vidas Útiles utilizadas para las modelaciones de ACV y Análisis de Costos de Ciclo de Vida fueron estimadas consultando con comunicación directa a Ingenieros del Instituto de Ingeniería, los cuales tienen suficiente experiencia en su campo para poder hacer dichas estimaciones, no obstante se recomienda la elaboración de un estudio estadístico con datos históricos para la determinación de las distintas Vidas Útiles reales de los escenarios considerados (incluyendo especial atención en la afectación del uso de cal hacia la vida útil del Escenario 2), tomando en cuenta las condiciones geográficas y meteorológicas de la CDMX, posiblemente realizando

experimentos prácticos en los que se utilicen las tecnologías mencionadas en esta tesis. En este caso, se podría recurrir a los datos de la Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX (SOBSE) o a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), haciendo una petición para que hicieran públicos los datos recabados sobre el rendimiento histórico de sus obras y rehabilitaciones de caminos, calles y carreteras.

- Para el Análisis del Costo del Ciclo de Vida se menciona que no se toma en cuenta para la cuantificación de costos la inversión inicial o el costo de renta de los equipos especializados para realizar los tratamientos de rehabilitación descritos en los distintos escenarios propuestos, por lo que se propone la investigación y contabilidad de dichos costos para lograr una mayor cantidad de información que se pueda utilizar para tomar decisiones coherentes y con base en la investigación.
- También para poder tomar decisiones completas se recomienda la elaboración de un ACV Social, para poder evaluar los escenarios de una manera más holística que contribuya hacia el camino de economía circular.

REFERENCIAS

- APA. (2011). *LIFE-CYCLE COST ANALYSIS: A POSITION PAPER* (p. 5). <http://www.asphaltroads.org/why-asphalt/>
- Arquitect. (2016). *Petrolizadoras*. 4(1), 64–75. <http://www.arqtec.com.mx/wp-content/uploads/2013/10/Servicios-completos-arquitect.pdf>
- Banxico. (2020). *Tasas de Inflación*.
- Basso, D. (n.d.). *Máquina fresadora de pavimentos*. http://www.domingobasso.com/downloads/download.php?5fe6a262f6591cd7e6988399ac249ba3_contenidos
- Butt, A. A. (2012). Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements including the Feedstock Energy and Asphalt Additives. In *Licentiate Thesis, TRITA-TSC-LIC 12-008, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*. (Issue October 2012). <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:556427/FULLTEXT01.pdf>
- Caballero Güereca, C. E. (2020). *Apéndice 1: Encuesta de evaluación de softwares de análisis de ciclo de vida* (p. 1).
- Caterpillar. (2009). *Compactadores de suelos vibratorios Cs44 cp44*.
- Caterpillar. (2010). *PS150C*.
- Diario de la Federación. (2013). Ley general del equilibrio ecológico y protección del medio ambiente. *Ley General Del Equilibrio Ecológico y Protección Del Medio Ambiente*, 17. <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf%0Ahttps://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf%0Ahttp://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
- Díaz Infante de la Mora, L. A. (2018). *Curso de edificación* (3a ed.). Trillas.
- Doka, G. (2003). Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. *Ecoinvent Report No. 13, 0(13)*, 101.
- Expansión. (2021). *México baja sus tipos de interés*. <https://datosmacro.expansion.com/tipo-interes/mexico>
- García, J. (2012). *Petrolizadoras*. <https://www.monografias.com/trabajos93/petrolizadora/petrolizadora.shtml>
- Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J. A., Romero, S. A., & Alarcón, H. A. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. *Secretaría De Comunicaciones Y Transportes*, 246, 1–53. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>
- Giani, M. I., Dotelli, G., Brandini, N., & Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 224–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J., Schryver, A. De, Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). Category indicators at the midpoint and the endpoint level ReCiPe 2008. *ResearchGate*, June 2016, 126.
- GreenDelta. (2020). *openLCA*. <http://www.openlca.org/>
- Grupo Selome S.A. de C.V. (2009). *MIA Regional, Carretera México-Tuxpan*. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/pue/estudios/2006/21PU2006V0004.pdf>
- Güereca, L. P. (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Güereca, L. P., Juárez-López, C. R., & Ossa-López, A. (2014, October). Evaluación comparativa de los impactos ambientales de dos tipos de pavimentos. *104*, 18–20.

- HAMM. (n.d.). *Compactador con tambor liso Compactadores Serie 3000 / Gama H179 ASPECTOS MÁS DESTACADOS 3000*.
- Hasan, U., Whyte, A., & Al Jassmi, H. (2020). Life cycle assessment of roadworks in United Arab Emirates: Recycled construction waste, reclaimed asphalt pavement, warm-mix asphalt and blast furnace slag use against traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120531>
- Hernández-Michaca, J. L., Sánchez-Granados, V. M., Castillo-Chaires, I., Damián-Hernández, S. A., & Téllez-Gutiérrez, R. (2001). *Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: pavimentos rígidos* (Issue 173). <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt173.pdf>
- ifu Hamburg. (2020). *Umberto LCA+*. <https://www.ifu.com/en/umberto/lca-software/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). *Síntesis metodológica de la Estadística de vehículos de motor registrados en circulación*. 20. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825086084.pdf
- ISO. (2006). ISO 14040-Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. *International Organization for Standardization*, 3, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- Jelse, K., Eriksson, E., & Einarson, E. (2009). *Life Cycle Assessment of consumer packaging for liquid food - LCA of Tetra Pak and alternative packaging on the Nordic market*. 46(0), 160.
- Ma, F., Dong, W., Fu, Z., Wang, R., Huang, Y., & Liu, J. (2020). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from asphalt pavement maintenance: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125595. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125595>
- Maquinarias-Pesadas. (2010). *Tablas rendimiento, consumo combustible, costo maquinaria pesada*. https://www2.slideshare.net/anmaguro/material-tablasrendimientoconsumocombustiblecostomaquinariapesada-55524542?from_action=save
- Mavis, J. (2003). Water Use in Industries of the Future : Mining Industry Contributed by : *Renewable Energy*, 1–7.
- Miranda-Rebolledo, R. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. *Universidad Austral De Chile*, 93.
- Molina, L. T., De Foy, B., Vázquez Martínez, O., Hugo, V., & Figueroa, P. (2009). Title Air quality, weather and climate in Mexico City. *WMO Bulletin*, 8(581), 48–53.
- Mroueh, U.-M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K., Markku-Juvankoski, E. M., & Ruotoistenmäki, A. (2000). *Life cycle assessment of Road construction*.
- MS Motorservice International. (2014). *Consumo y pérdida de aceite*. https://cdn2.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/Consumo-y-pérdida-de-aceite_51745.pdf
- N. Hernandez-Fernandez, L.P. Güereca-Hernandez, A. Ossa-Lopez, C. E. C.-G. (2019). *LCA Consortium for a road environmental-friendly infrastructure in Mexico City* (p. 7).
- Pantini, S., Borghi, G., & Rigamonti, L. (2018). Towards resource-efficient management of asphalt waste in Lombardy region (Italy): Identification of effective strategies based on the LCA methodology. *Waste Management*, 80, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.035>
- Peralta, O., Ortínez-Alvarez, A., Torres-Jardón, R., Suárez-Lastra, M., Castro, T., & Ruíz-Suárez, L. G. (2021). Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. *Science of the Total Environment*, 761, 143183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183>
- PRé. (2020). *SimaPro*.

- PROFEPA. (2019). *Manifestación de Impacto Ambiental- ¿Qué es la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA)?* <https://www.gob.mx/profepa/articulos/manifestacion-de-impacto-ambiental-mia>
- Santero, N., Masanet, E., & Horvath, A. (2010). *Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research*. <http://eetd.lbl.gov/staff/masanet/>
- Santos, J., Bressi, S., Cerezo, V., Lo Presti, D., & Dauvergne, M. (2018). Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.012>
- Schlegel, T., Puiatti, D., Ritter, H. J., Lesueur, D., Denayer, C., & Shtiza, A. (2016). The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 141–160. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.005>
- SCT. (2006). *CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. MATERIALES PARA PAVIMENTOS. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. Calidad de Materiales Asfálticos*. 1–13.
- SCT. (2017). *CATÁLOGO DE SECCIONES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS PARA LAS CARRETERAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA*. 1–14.
- SCT. (2019). *Tabulador De Precios Referenciales a Costo Directo Para Construcción, Modernización Y Conservación De Obras De Infraestructura Carretera 2018, 2019*, 1–136.
- thinkstep. (2020). *GaBi*.
- Tokede, O. O., Whittaker, A., Mankaa, R., & Traverso, M. (2020). Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements. *Structures*, 25(March), 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.026>
- United Nations. (2018). World Urbanization Prospects. In *Demographic Research* (Vol. 12). <https://doi.org/10.4054/demres.2005.12.9>
- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., & Rubio, M. C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.018>
- WIRTGEN Group. (2019). *Binding agent spreader SW 18 SC / SW 18 SC i At a glance : outstanding features of the SW 18 SC / SW 18 SC i*.
- WIRTGEN Group. (2020a). *Cold Recyclers and Soil Stabilizers WR Series*.
- WIRTGEN Group. (2020b). *Productos*. <https://www.wirtgen-group.com/es-mx/productos/>

APÉNDICE 1: ENCUESTA DE EVALUACIÓN DE SOFTWARES DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Esta encuesta fue llevada a cabo vía correo electrónico el 14 de febrero de 2020 al Dr. Alejandro de Jesús Padilla Rivera, miembro del Grupo de Ciclo de Vida, cambio climático y Sustentabilidad (CIVICCS), del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El Dr. Padilla es de las pocas personas en el Instituto de Ingeniería que tiene amplia experiencia con los 4 softwares que se comparan: openLCA, GaBi, Umberto y SimaPro.

Se le pidió al encuestado evaluar del 1 al 5 los siguientes aspectos de cada Software:

1. Interfaz de usuario intuitiva
2. Facilidad de aprendizaje
3. Calidad de las bases de datos
4. Precisión de resultados y cálculos
5. Prestigio

La matriz de respuesta se muestra a continuación, en la Tabla 49:

Tabla 49: Matriz de respuesta de encuesta del Dr. Alejandro Padilla Rivera

Software	Interfaz de usuario intuitiva	Facilidad de aprendizaje	Calidad de las bases de datos	Precisión de resultados y cálculos	Prestigio
openLCA	3	4	4	4	3
GaBi	2	2	3	3	4
Umberto	5	5	5	5	4
SimaPro	4	4	4	4	5

Adicionalmente, el encuestado añadió:

“Hay dos cosas a precisar en las preguntas 4 y 5 referente a las bases de datos y resultados. Primero, la base de datos es independiente al software ya que la calidad de datos depende 1) de la base de datos y 2) del inventario del genere el usuario. Es decir, puedes tener un buen software, pero si no tienes datos de calidad tus resultados no serán los óptimos. Y esto está ligado a la pregunta 5. La precisión de los resultados depende del inventario y a su vez a los datos generados por el usuario. En teoría si modelas los resultados con el mismo inventario y usando el mismo método de evaluación de impacto los resultados serían similares.”

APÉNDICE 2: FICHA TÉCNICA DE FRESADORA LXL1000A (BASSO, N.D.)



Máquina fresadora de pavimentos con profundidad de fresado de 1m

Características

1. Impulso de eje frontal hidráulico, cambio de velocidades continuo de dos marchas.
2. Impulso en todas las ruedas opcional para un aumento de tracción.
3. Tambor de fresado tiene un impulso completamente hidráulico. Se usa una bomba hidráulica importada y desplazamiento amplio, baja velocidad, motor de par alto.
4. Nuestra máquina fresadora de pavimentos es pesada, lo que no sólo aumenta efectivamente la capacidad de fresado, sino que también reduce la incomodidad del operador causada por la vibración de fresado.
5. Freno hidráulico, el reductor de desplazamiento está equipado con un sistema de freno de mano para una mayor seguridad.

Especificaciones de la máquina fresadora para pavimentos de 1m

Modelo	LXL1000A
Índice de potencia	132kw
Índice de velocidad	2200rpm
Ancho de fresado máximo	1010mm
Profundidad de fresado	0-150mm
Número de cabezales de fresado	80 piezas
Velocidad de desplazamiento	0-7.6 km/h
Velocidad de operación	0-48m/min
Gradeabilidad teórica	17%
Peso de operación	12500kg
Distancia mínima	180mm
Dimensiones de la máquina principal	4240mmx2190mmx3280mm

APÉNDICE 3: FICHA TÉCNICA DE PETROLIZADORA ESCUDERO E-20000 (GARCÍA, 2012)

Petrolizadora Escudero Modelo E-20000

- ↳ La E-20000 cuenta con las siguientes características: su capacidad es de 20,000 lts., en dos compartimientos: uno como tanque de trabajo (6,000 lts.) y la otra sección como almacenamiento (14,000 lts.). Este Modelo es un equipo totalmente adecuado para las grandes obras que requieren los riegos de emulsión o para las obras que se encuentran a gran distancia de la base de almacenamiento

APÉNDICE 4: FICHA TÉCNICA DE FINISHER CAT AP1000 (MAQUINARIAS-PESADAS, 2010)

Fecha: 26/10/2010 Hora: 05:32:31p.m.

Categoría TERMINADORAS DE ASFALTO SOBRE LLANTAS

Subcategoría Terminadoras de asfalto sobre llantas

Fabricante Caterpillar

Modelo AP-1000

Año 1.999

Precio (\$USD) \$ 79.000

Precio (\$COL) \$ 230.245.462,84

TRM \$ 1.831,00

Peso 29475 lbs

Tipo de Motor Diesel

Valor Llantas \$ 11.600.000

Potencia Neta (HP) 143,00

Potencia (HP) 0,00

Potencia Bruta (HP) 0

Capacidad Cubo/Cuchara N/A

Capacidad N/A

Tamaño

Tipo

Tamaño de Llantas N/A

Tamaño de Llantas Detanteras 22" X 14"

Tamaño de Llantas Traseras 18 X 25-16



Altura

Longitud (m) N/A

Ancho

Profundidad

Diametro

Operario \$ 11.149,00

Ayudante \$ 5.377,00

Mano de Obra \$ 16.528,00

	Precio (\$/gal)	Consumo (gal/hr)	Desperdicio (10%)	Valor (\$/hr)
ACPM	\$ 8.750,00	3,72	1,10	\$ 27.606,15
GASOLINA	\$ 7.758,00	0,15	1,10	\$ 1.280,07
ACEITE MOTOR	\$ 39.600,00	0,08	1,10	\$ 3.484,80
ACEITE TRANSMISION	\$ 44.000,00	0,03	1,10	\$ 1.452,00
ACEITE HIDRAULICO	\$ 50.500,00	0,02	1,10	\$ 1.111,00
GRASA	\$ 8.017,00	0,03	1,10	\$ 108,58
TOTAL				\$ 35.132,58

Filtros: \$ 7.026,52

Costo de Propiedad: \$ 19.522,97

Tarifa Directa Horaria: \$ 87.518,87

Tarifa Directa Semanal: \$ 1.151.760,80

Reparaciones: \$ 9.310,80

Costo de Operación: \$ 67.995,90

Tarifa Directa Diaria: \$ 630.135,85

Tarifa Directa Mensual: \$ 4.031.162,78

APÉNDICE 5: FICHA TÉCNICA DE COMPACTADOR DE RODILLO LISO HAMM 3410 (HAMM, N.D.)



3410

Compactador con tambor liso

Compactadores Serie 3000 / Gama H179



ASPECTOS MÁS DESTACADOS 3000

- > Articulación de 3 puntos para una excelente tracción y capacidad todoterreno
- > Manejo sencillo, intuitivo e independiente del idioma
- > Puesto ergonómico de mando del conductor con unidad de mando y asiento giratoria, asiento ajustable y columna de dirección basculante
- > Excelente visión de la máquina y la obra
- > Compactación de gran calidad gracias a la alta carga lineal y a las grandes amplitudes

Dimensiones de la máquina		
Longitud total (L)	mm	5695
Anchura (B)	mm	2250
Altura total (H)	mm	3020
Anchura de cilindro (X)	mm	2140
Altura de carga, mín. (HI)	mm	2320



EU Stage IIIA/EPA Tier 3

DATOS TÉCNICOS		Unidad	3410
Pesos			
Peso en estado de funcionamiento con cabina	kg	10535	
Peso en estado de funcionamiento con ROPS	kg	10315	
Peso en estado de funcionamiento máx.	kg	12060	
Carga sobre el eje, delante/detrás	kg	5690/4845	
Carga lineal estática, delante	kg/cm	26,6	
Clasif. franc. M1/LxAO(-2)/clase		43,3/VM3	
Dimensiones de la máquina			
Longitud total	mm	5695	
Altura total con cabina	mm	3020	
Altura de carga, mín.	mm	2320	
Distancia entre ejes	mm	3005	
Anchura total con cabina	mm	2250	
Distancia del suelo, centro	mm	375	
Radio de giro de dirección, interior	mm	4005	
Inclinación del terraplén, delante/detrás	°	31/34	
Dimensiones de los cilindros			
Anchura del cilindro, delante	mm	2140	
Diámetro del cilindro, delante	mm	1504	
Grosor del cilindro, delante	mm	25	
Tipo de cilindro, delante		liso	
Dimensiones de los neumáticos			
Dimensión de los neumáticos, detrás		AW 23.1-26 12 PR	
Motor diésel			
Fabricante		DEUTZ	
Tipo		TCD 2012 L04 2V	
Cilindros, cantidad		4	
Potencia ISO 14396, kW/PS/rpm		100,0/136,0/2300	
Potencia SAE J1349, kW/HP/rpm		100,0/134,0/2300	
Norma sobre gases de escape		EU Stage IIIA/EPA Tier 3	
Mecanismo de traslación			
Velocidad, ciclo de trabajo	km/h	0-5,7/0-7,6/0-7,9	
Velocidad, ciclo de transporte	km/h	0-12,0	
Capacidad ascensional, con/sin vibración	%	48/53	
Vibración			
Frecuencia de vibración, delante, I/II	Hz	27/37	
Amplitud, delante, I/II	mm	1,90/0,80	
Fuerza centrífuga, delante, I/II	kN	246/144	
Dirección			
Ángulo de suspensión pendular +/-	°	10	
Dirección, tipo		Dirección pivotante	
Capacidad del depósito/volumen de relleno			
Depósito de combustible, capacidad	L	290	
Nivel acústico			
Potencia acústica Lw(A), etiqueta adhesiva		107	
Potencia acústica Lw(A), medida		103	

EQUIPAMIENTO

2 apoyabrazos, Articulación de 3 puntos, Rascador ajustable, Tablero de instrumentos con pantallas, pilotos de control y tecla, Control de tracción automático y sistema antipatinamiento, Desconector de batería, Puesto de servicio con ajuste de columna de dirección, Plataforma del operador accesible por ambos lados, Fijación previa de la velocidad, Dirección hidrostática, Plataforma del operador acoplado con oscilación, Tracción total hidrostática progresiva, Barandillas en la plataforma del operador, Hoja de nivelación, Insonorización

EQUIPAMIENTO ESPECIAL

Cabina ROPS, ROPS, rígido, Calefacción auxiliar, Radio, Techo de protección, Segmentos de pata de cabra, Versión con prefiltro de combustible adicional, Compactómetro HAMM (HCM), Velocímetro, Indicador de frecuencia, vibración, Alarma de marcha atrás, Interfaz telemática, Sistema automático de vibración, Faro de trabajo, Luz omnidireccional, Protección de lámparas, Protección de manguera hidráulica en bastidor delantero

HAMM AG
 Hammstraße 1
 D-95643 Tirschenreuth
 Tel +49 9631 80-0
 Fax +49 9631 80-111
 www.hamm.eu



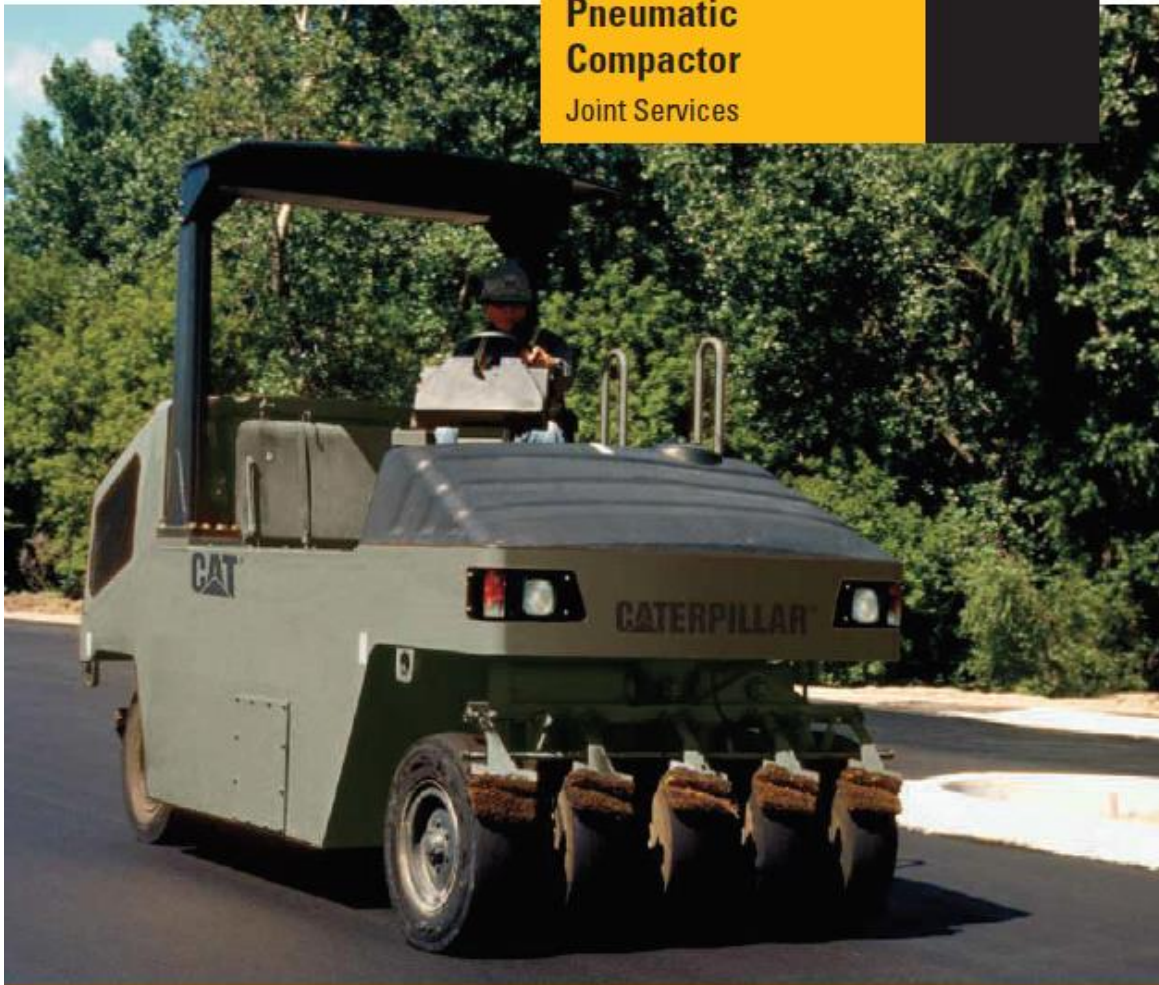
Compactadores / Serie 3000 EU Stage IIIA/EPA Tier 3/ 3410 12.19.2233184 es-ES V2
 Solicite información sobre otros datos/ Nos reservamos el derecho a efectuar modificaciones
 Las ilustraciones pueden contener equipamiento opcional.

APÉNDICE 6: FICHA TÉCNICA DE COMPACTADOR DE NEUMÁTICOS CATERPILLAR PS150C (CATERPILLAR, 2010)

PS150C 

Pneumatic Compactor

Joint Services



Cat® 3054C Turbocharged Diesel Engine

Gross Power	75 kW	100 hp
-------------	-------	--------

Weight

Operating Weight	12 940 kg	28,535 lb
Heavy Weight	17 273 kg	38,000 lb

Width

Roller Width	1743 mm	69 in
--------------	---------	-------

MISSION CAPABLE

The Cat® PS150C Pneumatic Compactor – Tested, Proven, and Reliable – Mission Capable

The Cat PS150C Pneumatic Compactor is equipped with a 100 hp turbocharged diesel engine providing excellent performance, reliability, and fuel economy. The PS150C delivers superior operational readiness for the construction of asphalt roads.

The U.S. Military Cat PS150C is also designed with transportability in mind, incorporating MIL-STD-209K lift and tiedown modifications.

Operator's Station. The PS150C Pneumatic Compactor features excellent operator comfort and visibility. The propel lever, grouped control gauges and conveniently located control switches enhance operator productivity and reduce fatigue. An optional control console rotates to three different positions, left, right or center and allows the operator to view the front tire contact points.



Water System. The gravity water system is efficient and reliable. The system includes galvanized distribution bars over the front and rear tires and retractable nylon scrapers for each tire. A polyethylene water tank is located at the front of the machine and a water level gauge is on the tank within easy sight of the operator.

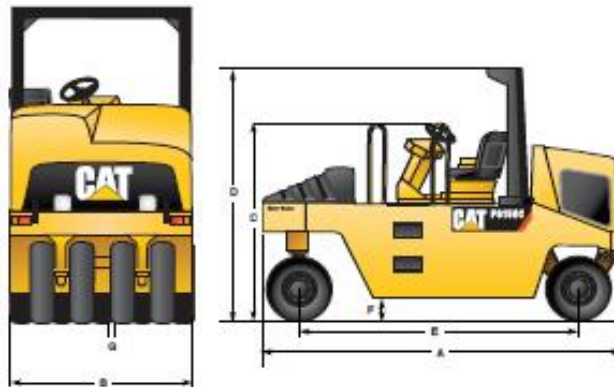
Versatility. The oscillating front and rear wheels seek out and compact soft spots. The oscillating wheels also provide even wheel loads and uniform compaction across the rolling width.

Front and rear wheels paths. The front and rear wheel paths overlap 1/2 inch to provide a full-width coverage of 69 inches to provide maximum surface compaction without missing targeted areas. The front and rear wheel bolsters also oscillate to allow uniform compaction across entire rolling width.



Machine Dimensions

A Length	4.29 m	14' 1"
B Compaction width	1.74 m	5' 8"
C Height at steering wheel	2.32 m	7' 7"
D Height at ROPS	3.0 m	9' 10"
E Wheel base	3.34 m	10' 11"
F Ground clearance	267 mm	10.5"
G Tire overlap	13 mm	0.5"
Outside turning radius	6.45 m	21' 2"
Inside turning radius	4.64 m	15' 3"
Oscillation angle	±4.4 degrees	



SERVICEABILITY

Worldwide Locations. The Caterpillar global network of authorized dealers supports the U.S. Military in every corner of the globe. With heavy construction equipment dealers located in over 200 countries, Caterpillar's support organization provides global coverage.



Service Capabilities. Cat field service technicians have the experience and tools necessary to service your equipment on-site. Field service trucks are fully loaded with state-of-the-art tools and diagnostic equipment as well as specifications and schematics for every Cat machine. Technical experts at the Dealership and at Caterpillar are available to provide assistance to field service technicians when needed. When on-site repair isn't enough, Cat Dealerships are fully-equipped to service your equipment quickly.

Dealer Support. The Caterpillar global network of authorized dealers is the best in the world at providing support to keep your equipment up and running. With 99.7% of parts shipped within 24 hrs, Cat Dealers are supporting the Cat PS150C Pneumatic Compactor.

Engine

Four-stroke cycle, four cylinder 3054C turbocharged diesel engine. The engine meets U.S. EPA Tier 2 emissions regulations.

Ratings at	RPM	kW	hp
Gross Power	2200	75	100

Transmission

Speed (forward and reverse):

Low	0 - 11 km/h (6.8 mph)
High	0 - 25.6 km/h (15.9 mph)

Ballast

Ballast Capacities

Primary	3,9 m ² (139 ft ²)
Secondary	0,4 m ² (11 ft ²)
Total	4,3 m ² (150 ft ²)

Ballast Materials

0,028 m³ (1 ft³) of wet sand weighs 57 kg (125 lb)

0,028 m³ (1 ft³) of water weighs 28 kg (62.4 lb)

Service Refill Capacities

	L	gal
Fuel tank*	173	45.6
Cooling system	16,1	4.2
Engine oil (w/filter)	7,3	1.9
Brake	0,3	0.08
Axle	2,7	0.71
Hydraulic tank	54,9	14.5
Water (spray) tank	394	104

*Note: Actual fuel tank capacity is 162 L (42.5 gal)

Steering

Steering is hydraulic power-assist for responsive, low-effort machine handling.

Minimum turning radius:

Inside	4648 mm (15' 3")
Outside	6453 mm (21' 2")

Wheels and Tires

6 Ply: 8.50/90 x 15

5 wheels front, 4 wheels rear



Remanufactured Parts. Cat engines and major components are designed to be remanufactured and provide multiple life cycles. Components are remanufactured in the factory to original specifications with necessary product updates.

MILITARY MODIFICATIONS

- MIL-STD-209K Lift and Tiedown Provisions
- NATO Start Receptacle
- Rifle Bracket
- External Military Paint
- C17 and C5 RO/RO Air Transportable
- Keyless Engine Start Switch

STANDARD EQUIPMENT

Standard equipment may vary. Consult Caterpillar Defense & Federal Products for details.

Operator Environment

- Gage package
- ROPS
- Fixed, non-suspension seat with 3" wide seat belt
- Vandalism protection

Electrical

- 24-volt electric starting
- 55-ampere alternator
- Two Cat maintenance free batteries
- Halogen working lights, bumper mounted (2 front-facing and 2 rear-facing)
- Backup alarm and forward warning horn
- Product Link wire-ready

Powertrain

- Cat 3054C DIT diesel engine with glow plug start aid (100HP/75 kW, four-cylinder)
- Dual element air cleaner
- Fuel filter/water separator
- Two-speed throttle switch
- Dual braking systems (service & parking)
- Hydrostatic transmission
- Direct "high" drive – no chains

Other Standard Equipment

- Locking fiberglass engine enclosure
- All wheel oscillation
- Gravity water system with distribution bars over front and rear tires and individual retractable steel tire scrapers
- Manual brake release

- Hydraulic tank cap lock
- Nine 8:50/90 x 16 6-ply bias tires
- Transport tiedown and lift points
- Power assisted steering
- 104 gal (394L) water tank capacity
- Quick connect hydraulic pressure test ports
- S-O-S™ ports: engine, hydraulic and coolant
- Coco mats
- Remote drains for all fluids

Antifreeze

- Premixed 50% concentration of Extended Life Coolant with freeze protection to -37C (-35F)

For more information visit: www.catdfp.com

All dimensions are approximate. Dimensions may vary with configuration. Specific military service configurations are available upon request.

© 2010 Caterpillar | All Rights Reserved | Printed in the USA
 Materials and specifications are subject to change without notice. Featured machines may include additional equipment. See your account manager for available options.
 CAT, CATERPILLAR, their respective logos, "Caterpillar Yellow" and the Power Edge trade dress, as well as corporate and product identity used herein, are trademarks of Caterpillar and may not be used without permission.



APÉNDICE 7: FICHA TÉCNICA DE SPREADER SW 18 SCI STREUMASTER (WIRTGEN GROUP, 2019)



	Binding agent spreader SW 18 SC	Binding agent spreader SW 18 SCi
Container		
Container capacity	18 m ³	
Size of filling connector/filling hose	3"/4"/5"	
Chain conveyor		
Width of chain conveyor	950 mm	
Opening height of slide gate	350 mm	
Spreading unit (metering feeders)		
Diameter of spreading unit	410 mm	
Working width/Partial widths	Standard: 2,360 mm / 820 mm 720 mm 820 mm Option: 2,760 mm / 920 mm 920 mm 920 mm	
Spread rate at 2 km/h ^{*1}	5 to 60 l/m ²	
Engine		
Manufacturer	Mercedes Benz	
Type	OM 906 IA	OM 936 IA
Cooling	Water	
Number of cylinders	6	
Maximum power	205 kW/275 HP/279 PS	210 kW/282 HP/286 PS
Rated speed in spreading mode	1,500 rpm	
Displacement	6,400 cm ³	7,200 cm ³
Exhaust emission standard	EU Stage 2/US Tier 2	EU Stage 4/US Tier 4f
Filling capacities		
Fuel	380 l	300 l
AdBlue®/DEF ^{*2}	-	30 l
Hydraulic fluid	156 l	
Carrier vehicle		
Vehicle model	Bell - B25E	
Driving performance		
Max. travel speed	35 km/h	
Turning radius (outside)	8.0 m	
Ground clearance of the spreading unit	660 mm	
Tyres		
Tyre size	750 / 65 - 26	
Weights		
Empty weight ^{*3}	20,700 kg	
Permissible total weight ^{*4}	max. 45,000 kg	
Dimensions		
Transport dimensions (L x W x H) ^{*5}	10,510 x 3,260 x 3,620 mm	

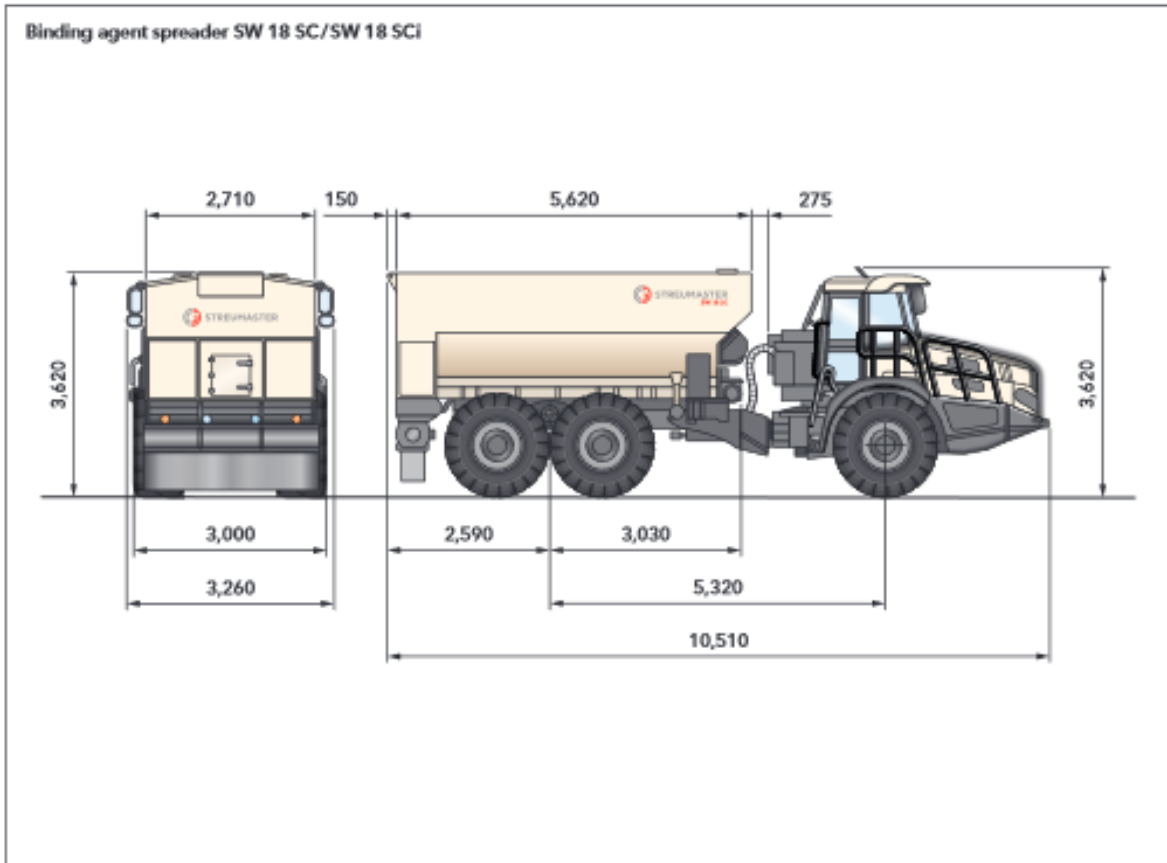
*1 – The spread rate depends on various parameters (such as type of binder, type of spreading unit or site conditions)

*2 – AdBlue® is a registered trademark of the Association of the Automotive Industry (Verband der Automobilindustrie e. V.; VDA)

*3 – Basic machine excluding optional equipment features

*4 – On public roads adhering to the German Road Traffic Licensing Regulation (Straßenverkehrszulassungsordnung; StVZO)

*5 – With standard tyres in mounted condition



Dimensions in mm

Made by STREUMASTER Maschinenbau GmbH



WIRTGEN GmbH
 Reinhard-Wirtgen-Str. 2 · 53578 Windhagen · Germany
 Phone: +49 (0)2645/131-0 · Fax: +49 (0)2645/131-392
 Internet: www.wirtgen.com · E-mail: info@wirtgen.com

APÉNDICE 8: FICHA TÉCNICA DE WR XLI SOIL STABILIZER WIRTGEN (WIRTGEN GROUP, 2020A)

A WIRTGEN GROUP COMPANY



Maximum quality in every application.
Cold Recyclers and Soil Stabilizers
WR Series
WR 200 XLi | WR 240i | WR 250i



US RELEASE

	WR 200 XLi	WR 240i	WR 250i
Milling and Mixing Rotor			
Working width	7 ft 10 in (2,400 mm)		
Working depth*1	0 to 19.7 in (0 to 500 mm)	0 to 20.1 in (0 to 510 mm)	0 to 22 in (0 to 560 mm)
Tool spacing	0.8 in (20 mm)	0.8 in (20 mm)	1.2 in x 2 (30 mm x 2)
Number of tools	170	170	208
Cutting diameter	4 ft 10 in (1,480 mm)		
Engine			
Engine manufacturer	Mercedes-Benz/MTU	Cummins	Caterpillar
Type	OM 470 LA/6R 1100	X-15	C18 ATAAC
Number of cylinders	6		
Power	at 1,900 rpm: 308 kW/412 HP/418 PS	at 2,100 rpm: 447 kW/600 HP/608 PS	at 1,950 rpm: 563 kW/755 HP/766 PS
Maximum power	at 1,700 rpm: 320 kW/429 HP/435 PS	at 1,900 rpm: 455 kW/610 HP/619 PS	at 1,700 rpm: 563 kW/755 HP/766 PS
Displacement	2.8 gal (10.7 l)	3.9 gal (14.9 l)	4.8 gal (18.1 l)
Fuel consumption, full load during mixture of job site operations	19.8 gal/h (75 l/h) 9.2 gal/h (35 l/h)	30.4 gal/h (115 l/h) 14.5 gal/h (55 l/h)	38.8 gal/h (147 l/h) 19 gal/h (72 l/h)
Sound power level in accordance with DIN EN 500-3 engine operator's platform	≤106 dB(A) ≥70 dB(A)	≤109 dB(A) ≥72 dB(A)	≤112 dB(A) ≥74 dB(A)
Emissions standards	US EPA Tier 4f	US EPA Tier 4f	US EPA Tier 4f
Electrical System			
Power supply	24 V		
Tank Capacities			
Fuel tank	219.3 gal (830 l)	364.6 gal (1,380 l)	363.3 gal (1,500 l)
Fuel tank when equipped with optional "S-Pack"	–	311.7 gal (1,180 l)	343.4 gal (1,300 l)
AdBlue®/DEF tank*2	21.1 gal (80 l)	26.4 gal (100 l)	–
Hydraulic oil tank	52.8 gal (200 l)	84.5 gal (320 l)	
Binder container	–	194.2 ft³ (5.5 m³)	
Water tank	100.4 gal (380 l)	132.1 gal (500 l)	
Additional water tank	–	251 gal (950 l)	
Driving Performance			
Operating speed in milling and travel gear	0 to 700 ft/min (0 to 210 m/min) (7.8 mph (12.6 km/h))		
Max. cross slope	8°		
Ground clearance	approx. 16 in (400 mm)		
Tires			
Tire size, front/rear	620/75 R26	28L – 26	
Transport Dimensions			
Dimensions for truck transport (L x W x H)	30 ft 1 in x 9 ft 10 in x 9 ft 10 in (9,160 x 2,990 x 3,000 mm)	30 ft 3 in x 9 ft 10 in x 9 ft 10 in (9,230 x 3,000 x 3,000 mm)	
Dimensions for truck transport with optional "S-Pack" (L x W x H)	–	31 ft 9 in x 9 ft 10 in x 10 ft 1 in (9,680 x 3,000 x 3,080 mm)	

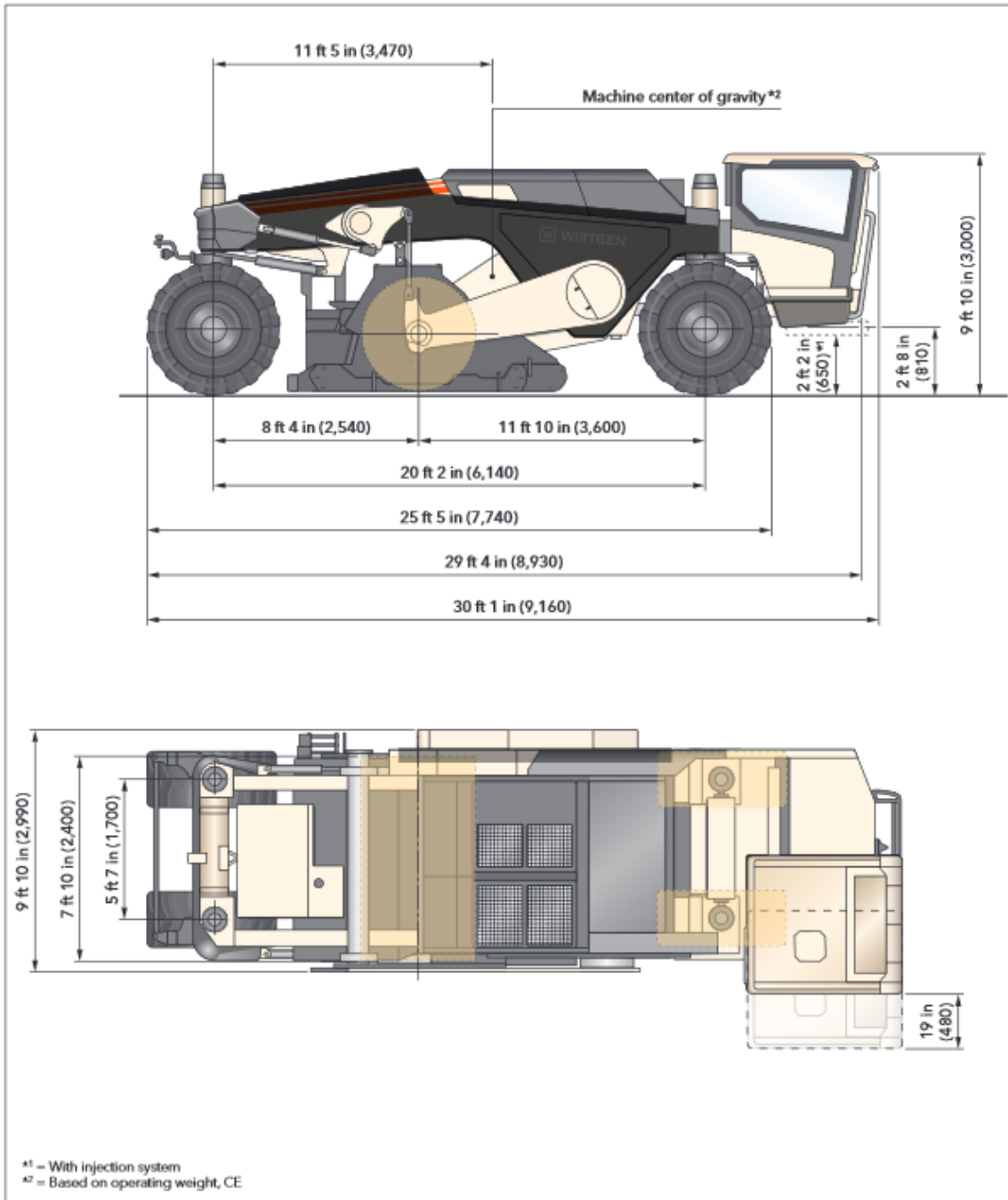
*1 – The maximum working depth may deviate from the value indicated due to tolerances and wear.

*2 – AdBlue® is a registered trademark of the German Association of the Automotive Industry (VDA)

	WR 200 XLI	WR 240i	WR 250i
Weight of Standard Machine			
Empty weight of machine with standard equipment without fluids	55,556 lbs (25,200 kg)	65,257 lbs (29,600 kg)	68,454 lbs (31,050 kg)
Operating weight, CE*1	57,100 lbs (25,900 kg)	67,462 lbs (30,600 kg)	70,548 lbs (32,000 kg)
Maximum operating weight (full tanks, full range of equipment)	60,407 lbs (27,400 kg)	90,390 lbs (41,000 kg)	95,681 lbs (43,400 kg)
Weight of Tank Contents			
Water	838 lbs (380 kg)	1,102 lbs (500 kg)	
Additional water tank	–	2,094 lbs (950 kg)	
Fuel (6.9 lbs / gal (0.83 kg/l))	1,521 lbs (690 kg)	2,524 lbs (1,145 kg)	2,745 lbs (1,245 kg)
Fuel (6.9 lbs / gal (0.83 kg/l)) when equipped with optional "S-Pack"	–	2,139 lbs (970 kg)	2,359 lbs (1,070 kg)
AdBlue®/DEF**	176 lbs (80 kg)	221 lbs (100 kg)	–
Binding agent (S-Pack)	–	11,023 lbs (5,000 kg)	
Additional Weight			
Operator and Tools			
Machine operator	165 lbs (75 kg)		
5 pick buckets	276 lbs (125 kg)		
Injection system instead of standard			
Single ESL: Injection system for water or bitumen emulsion	1,014 lbs (460 kg)	860 lbs (390 kg)	
Dual ESL: Injection system for water and bitumen emulsion	–	1,587 lbs (720 kg)	
ESL foamed bitumen: Injection system for water and foamed bitumen	–	3,087 lbs (1,400 kg)	
ESL 1800 L: Injection system for water up to 475.5 gal / min (1,800 l / min)	904 lbs (410 kg)	860 lbs (390 kg)	
Built-in binding agent spreader (S-Pack) with exhaust filter	–	8,378 lbs (3,800 kg)	
Optional Additional Equipment			
Additional water tank (empty)	–	926 lbs (420 kg)	

*1 = Machine weight, half-full tanks, vehicle tool kits, machine operator (165 lbs (75 kg)), excluding optional equipment

** = AdBlue® is a registered trademark of the German Association of the Automotive Industry (VDA)



Dimensions in American standard and mm

APÉNDICE 9: FICHA TÉCNICA DE PATA DE CABRA CATERPILLAR CS/CP44 (Caterpillar, 2009)

Compactadores de
Suelos Vibratorios

CS44

CP44

CATERPILLAR



Motor Diesel C4.4 Cat® con tecnología ACERT™

Potencia nominal (ISO 14396)	75 kW	100 hp
Certificado bajo las normas EPA Tier 3 de los Estados Unidos y Stage IIIa europea		

Peso en orden de trabajo con Estructura de Protección en Caso de Vuelcos (ROPS)/Estructura de Protección Contra Objetos que Caen (FOPS)

CS44	6.900 kg	15.212 lb
CP44	7.295 kg	16.083 lb

Fuerza centrífuga

Alta	134 kN	30.000 lb
Baja	67 kN	15.000 lb

Especificaciones del tambor y del sistema vibratorio

Dimensiones

Ancho del tambor	1.676 mm	66"
Grosor del casco del tambor	25 mm	1"
Diámetro del tambor, CS44	1.221 mm	48"
Diámetro del tambor, CP44 (sobre los pisones)	1.225 mm	48"
Pisones (CP44)		
Cantidad de pisones	108	
Altura del pistón	90 mm	3,5"
Área de la superficie del pistón	63,8 cm ²	9,9 pulg ²
Cantidad de chevrons	12	
Impulsión de las pesas excéntricas	Hidrostática	

Pesos en el tambor

Con techo ROPS/FOPS		
CS44	3.410 kg	7.518 lb
CP44	3.760 kg	8.289 lb
Con cabina y aire acondicionado		
CS44	3.510 kg	7.738 lb
CP44	3.860 kg	8.510 lb

Carga lineal estática

CS44	20,3 kg/cm	114 lb/pulg
------	------------	-------------

Frecuencia

Estándar	31,9 Hz	1.914 vpm
Optativo	23,3 - 31,9 Hz	1.400 - 1.914 vpm

Amplitud nominal

CS44		
Alta	1,67 mm	0,066"
Baja	0,84 mm	0,033"
CP44		
Alta	1,59 mm	0,063"
Baja	0,80 mm	0,032"

Fuerza centrífuga a 31,9 Hz (1.914 vpm)

Máxima	134 kN	30.000 lb
Mínimo	67 kN	15.000 lb

Frenos

Características del freno de servicio

- Sistema de mando hidrostático de circuito cerrado que proporciona frenado dinámico durante la operación.

Características del freno secundario*

- Freno de disco múltiple, aplicado por resorte y liberado hidráulicamente, montado en el reductor del engranaje de mando del tambor. Los frenos secundarios se activan: con un botón en la consola del operador, por una pérdida de presión hidráulica en el circuito del freno o cuando el motor se para. Un sistema de traba de frenos ayuda a evitar la impulsión a través del freno secundario.

*Las máquinas vehiculares en la Unión Europea también están equipadas con frenos de eje tractor. El sistema de frenos cumple con las normas SAE J1472 y EN 500-4.

Dirección

El sistema de servodirección hidráulica de demanda prioritaria proporciona una dirección suave y de bajo esfuerzo. El sistema de dirección tiene prioridad sobre otras funciones hidráulicas.

Radio mínimo de giro:

Interior	3,08 m (10' 1")
Exterior	4,75 m (15' 7")

Ángulo de dirección:

(en cada sentido) ± 37°

Ángulo de oscilación:

(en cada sentido) ± 15°

Sistema hidráulico:

Dos cilindros de doble acción de 64 mm (2.5") de diámetro, impulsados por una bomba de engranajes.

Motor

Motor Diesel C4.4 Cat de cuatro cilindros y cuatro tiempos, con turbocompresión y tecnología ACERT. Cumple con las normas de control de emisiones EPA Tier 3 de los Estados Unidos y Stage IIIa de la Unión Europea en todo el mundo.

Potencia nominal	RPM	kW	hp
ISO14396	2.200	75	100

Las clasificaciones de los motores de las máquinas Cat se calculan con base en condiciones de aire estándar de 25 °C (77 °F) y 100 kPa (29,61 pulg de Hg) de barómetro seco. Este valor de potencia se obtiene con un combustible de peso específico API de 35 a 15 °C (60 °F), con un Valor Calorífico Bajo (LHV) de 42.780 kJ/kg (18.390 Btu/lb) cuando se usa a 30 °C (86 °F) [referida a una densidad del combustible de 838,9 g/L (7,001 lb/gal EE.UU.)]. La potencia neta anunciada es la potencia disponible al volante cuando el motor está

equipado con ventilador, filtro de aire, silenciador y alternador.

No se requiere reducción de potencia hasta una altitud de 3.000 m (9.842 pies).

Las siguientes clasificaciones aplican a 2.200 rpm cuando se prueban bajo las condiciones normales especificadas:

Potencia neta	kW	hp
ISO 9249	70,3	94,3
SAE J1349	72	96

Dimensiones

Calibre	105 mm	4,13"
Carrera	127 mm	5"
Cilindrada	4,4 L	269 pulg ³

El elemento doble, el filtro de aire seco con indicador visual de restricción, el auxiliar de arranque con bujía y el separador de combustible/agua son estándar.

Transmisión

Dos bombas de pistones de caudal variable suministran flujo presurizado a dos motores de pistones de cilindrada doble. Una bomba y un motor impulsan el sistema de propulsión del tambor, mientras que la otra bomba y el otro motor impulsan las ruedas traseras. El sistema de bomba doble garantiza el mismo flujo a los motores impulsores, independientemente de las condiciones de operación. En caso de que el tambor o las ruedas pierdan tracción, el otro motor puede todavía generar presión adicional para proporcionar par motor adicional.

Los motores impulsores tienen dos posiciones del plato oscilante que proporcionan operación a par motor máximo, para suministrar compactación y rendimiento en pendientes, o mayor velocidad, para desplazarse en el sitio de trabajo. Un interruptor basculante en la consola del operador activa un control eléctrico sobre hidráulico para cambiar las gamas de velocidad.

Instrumentos

El Módulo de Control Electrónico (ECM) monitorea constantemente el estado del motor y alerta al operador cuando ocurre un problema, utilizando tres niveles de alerta. El sistema de alerta incluye: alarma y luz de acción, presión baja del aceite del motor, temperatura alta del refrigerante del motor, temperatura alta del aceite hidráulico, presión de carga baja, auxiliar de arranque y temperatura alta del aire de combustión. Los instrumentos incluyen también una luz de avería en el alternador, revisar motor/ falla eléctrica, horómetro de servicio y medidor de combustible.

Bastidor

Se fabrica con planchas de acero de calibre pesado y secciones laminadas, y está unido a la horquilla del tambor en el pivote de la articulación. El área de la articulación está reforzada estructuralmente y unida con pasadores de acero endurecido. Un pasador vertical proporciona un ángulo de dirección de ± 37°, y un pasador horizontal permite una oscilación del bastidor de ± 15°. La traba de articulación evita la articulación de la máquina cuando se coloca en la posición trabada. Los cojinetes de enganche de sellado permanente no requieren mantenimiento. El bastidor incluye también puntos de amarre para el transporte.

Mandos finales y eje

El mando final es hidrostático con reductor de engranajes planetarios para el tambor e hidrostático con diferencial y reductor de engranaje planetario para cada rueda.

Eje:

Eje trasero fijo de servicio pesado, con un diferencial de patinaje limitado para proporcionar una transferencia de par motor suave y silenciosa.

Ancho del eje: 1,27 m (50")

Neumáticos:

CS44: 14,9" x 24" de 6 telas con flotación
CP44: 14,9" x 24" de 8 telas con tracción

Capacidades de llenado de servicio

	Litros	Galones EE.UU.
Tanque de combustible (utilizable)	168	44,4
Capacidad total	180	47,5
Sistema de enfriamiento	20,5	5,4
Aceite del motor con filtro	8,5	2,2
Caja de las pesas excéntricas	6	1,6
Eje y mandos finales	10,5	2,8
Tanque hidráulico	80	21,1

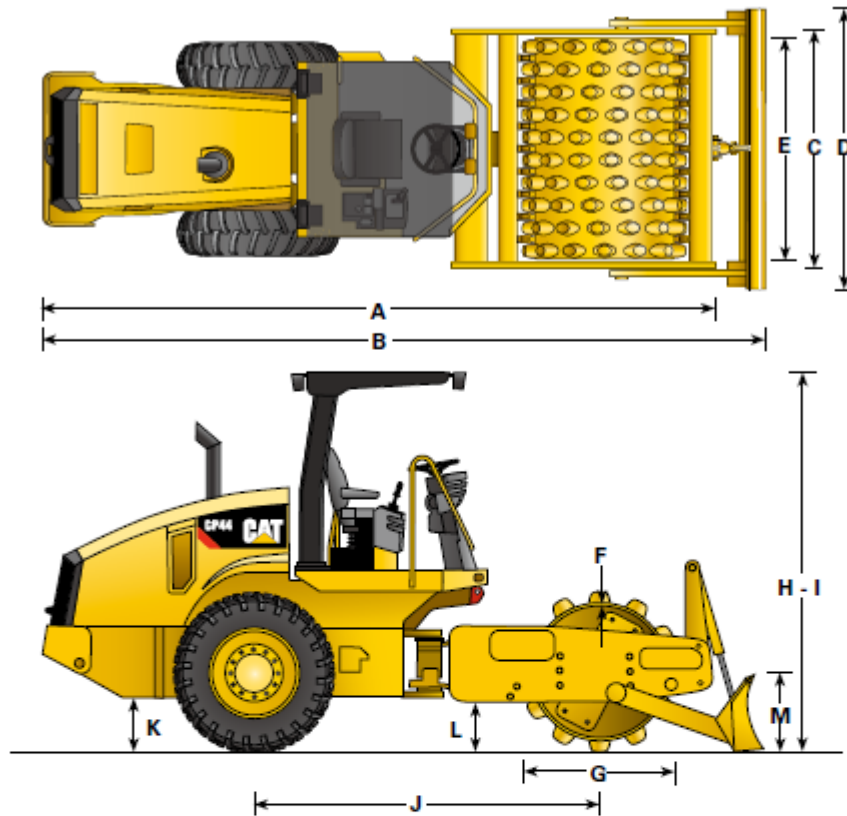
Sistema eléctrico

El sistema eléctrico de 24 voltios incluye dos baterías Cat libres de mantenimiento; los cables eléctricos están numerados, codificados con colores, recubiertos con nailon trenzado cubierto con vinilo y etiquetados con identificadores de componente. El sistema de arranque proporciona 750 Amperios de Arranque en Frío (CCA). El sistema incluye un alternador de 75 amperios. Un nuevo bloque de disyuntores proporciona fácil acceso a los disyuntores.

Velocidades máximas

Avance y retroceso

Baja	0-5,5 km/h	0-3,4 mph
Alta	0-12,3 km/h	0-7,6 mph



Dimensiones

	CS44		CP44	
A Longitud total	5,08 m	16' 8"	5,08 m	16' 8"
B Longitud total con hoja niveladora optativa	5,44 m	17' 10"	5,44 m	17' 10"
C Ancho total	1,8 m	5' 11"	1,8 m	5' 11"
D Ancho total con hoja niveladora optativa	2,12 m	6' 11"	2,12 m	6' 11"
E Ancho del tambor	1,68 m	5' 6"	1,68 m	5' 6"
F Grosor del casco del tambor	25 mm	1"	25 mm	1"
G Diámetro del tambor	1.221 mm	48"	1.225 mm	48"
H Altura hasta el techo ROPS/FOPS	2,93 m	9' 7"	2,93 m	9' 7"
I Altura hasta la cabina ROPS/FOPS	2,97 m	9' 9"	2,97 m	9' 9"
J Distancia entre ejes	2,60 m	8' 6"	2,60 m	8' 6"
K Espacio libre sobre el suelo	411 mm	16,2"	411 mm	16,2"
L Espacio libre vertical	380 mm	14,9"	380 mm	14,9"
M Altura de la hoja niveladora optativa	574 mm	22,6"	574 mm	22,6"
Radio de giro interior	3,08 m	10' 1"	3,08 m	10' 1"
Radio de giro exterior	4,75 m	15' 7"	4,75 m	15' 7"

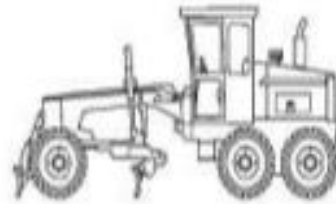
Especificaciones del CS44 y del CP44

Pesos en orden de trabajo	CS44		CP44	
con techo ROPS/FOPS	6.900 kg	15.212 lb	7.295 kg	16.083 lb
equipada con juego de estructura de pisonos	7.890 kg	17.394 lb	–	–
equipada con juego de estructura de pisonos y hoja	8.370 kg	18.453 lb	–	–
equipada con hoja	–	–	7.705 kg	16.987 lb
con cabina ROPS/FOPS y aire acondicionado	7.240 kg	15.961 lb	7.635 kg	16.832 lb
equipada con juego de estructura de pisonos	8.230 kg	18.144 lb	–	–
equipada con juego de estructura de pisonos y hoja	8.710 kg	19.202 lb	–	–
equipada con hoja	–	–	8.045 kg	17.736 lb
Peso en el tambor				
con techo ROPS/FOPS	3.410 kg	7.517 lb	3.760 kg	8.289 lb
equipada con juego de estructura de pisonos	4.400 kg	9.700 lb	–	–
equipada con juego de estructura de pisonos y hoja	5.060 kg	11.155 lb	–	–
equipada con hoja	–	–	4.310 kg	9.502 lb
con cabina ROPS/FOPS y aire acondicionado	3.510 kg	7.738 lb	3.860 kg	8.510 lb
equipada con juego de estructura de pisonos	–	4.500 kg	9.921 lb	–
equipada con juego de estructura de pisonos y hoja	5.160 kg	11.376 lb	–	–
equipada con hoja	–	–	4.410 kg	9.722 lb
Carga lineal estática (en el tambor)				
con techo ROPS/FOPS	20,3 kg/cm	114 lb/pulg	–	–
con cabina ROPS/FOPS y aire acondicionado	20,9 kg/cm	117,2 lb/pulg	–	–
Tren de fuerza				
Motor	C4.4 con tecnología ACERT		C4.4 con tecnología ACERT	
Potencia bruta	75 kW	100 hp	75 kW	100 hp
Velocidades máximas				
Gama alta	12,3 km/h	7,6 mph	12,3 km/h	7,6 mph
Gama baja	5,5 km/h	3,4 mph	5,5 km/h	3,4 mph
Eje (diferencial)	Patinaje limitado		Patinaje limitado	
Tamaño de neumático	14,9" x 24" de 6 telas		14,9" x 24" de 8 telas	
Varios				
Sistema eléctrico	24 VCC		24 VCC	
Ángulo de articulación	± 37°		± 37°	
Ángulo de oscilación	± 15°		± 15°	
Capacidad de combustible	180 L	47,5 gal EE.UU.	180 L	47,5 gal EE.UU.

APÉNDICE 10: FICHA TÉCNICA DE MOTOCONFORMADORA CAT 120 H

Fecha: 26/10/2010 Hora: 05:26:06p.m.

Categoría	MOTONIVELADORAS
Subcategoría	Motorizadoras articuladas
Fabricante	Caterpillar
Modelo	120H
Año	2.007
Precio (\$USD)	\$ 168.495
Precio (\$COL)	\$ 451.746.448,87
TRM	\$ 1.831,00
Peso	27880 lbs
Tipo de Motor	Diesel
Valor Llantas	\$ 9.048.000
Potencia Neta (HP)	125,00
Potencia (HP)	0,00
Potencia Bruta (HP)	0
Capacidad Cubo/Cuchara	N/A
Capacidad	N/A
Tamaño	12'
Tipo	
Tamaño de Llantas	N/A
Tamaño de Llantas Delanteras	13 X 24-10 (G2)
Tamaño de Llantas Traseras	13 X 24-10 (G2)



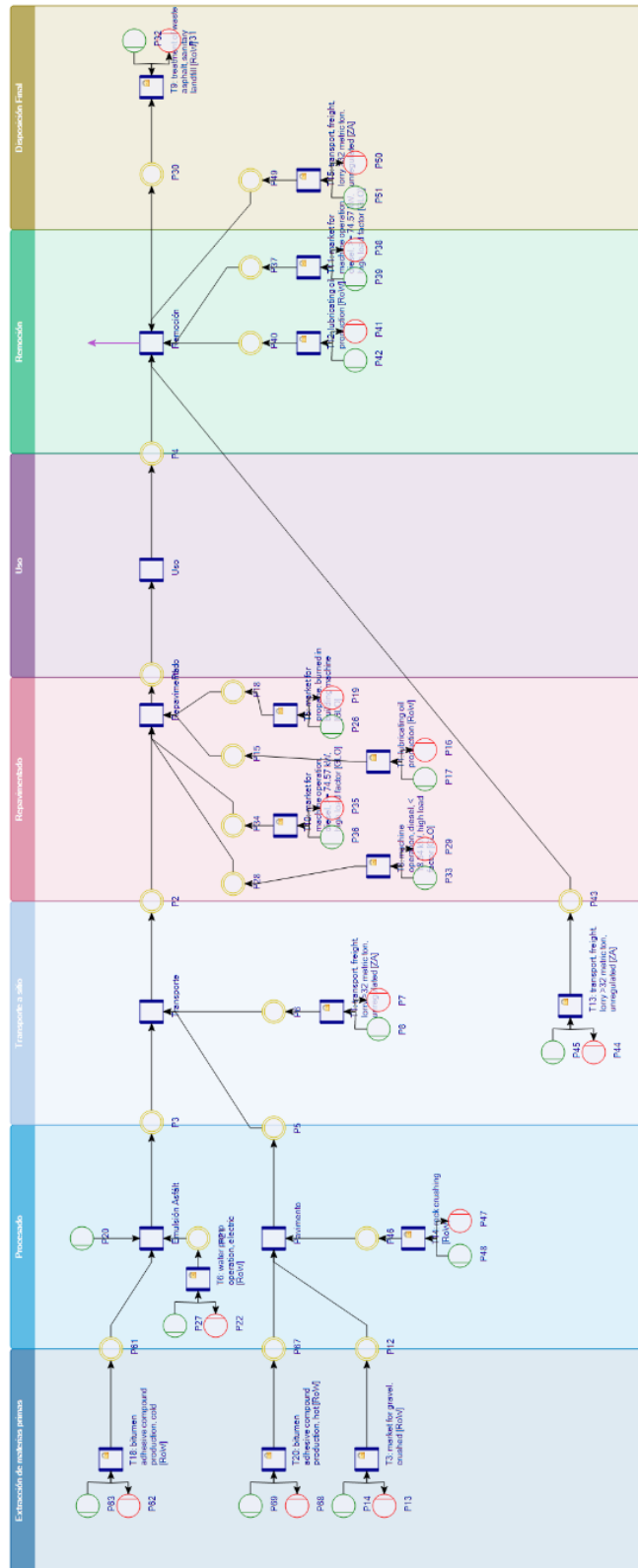
Altura	
Longitud (m)	N/A
Ancho	
Profundidad	
Diametro	
Operario	\$ 12.607,00
Ayudante	\$ 5.377,00
Mano de Obra	\$ 17.984,00

	Precio (\$/gal)	Consumo (gal/hr)	Desperdicio (10%)	Valor (\$/hr)
ACPM	\$ 8.750,00	3,25	1,10	\$ 24.131,25
GASOLINA	\$ 7.758,00	0,15	1,10	\$ 1.280,07
ACEITE MOTOR	\$ 38.600,00	0,07	1,10	\$ 3.049,20
ACEITE TRANSMISION	\$ 44.000,00	0,03	1,10	\$ 1.452,00
ACEITE HIDRAULICO	\$ 50.500,00	0,02	1,10	\$ 1.111,00
GRASA	\$ 8.017,00	0,03	1,10	\$ 198,56
TOTAL				\$ 31.222,08

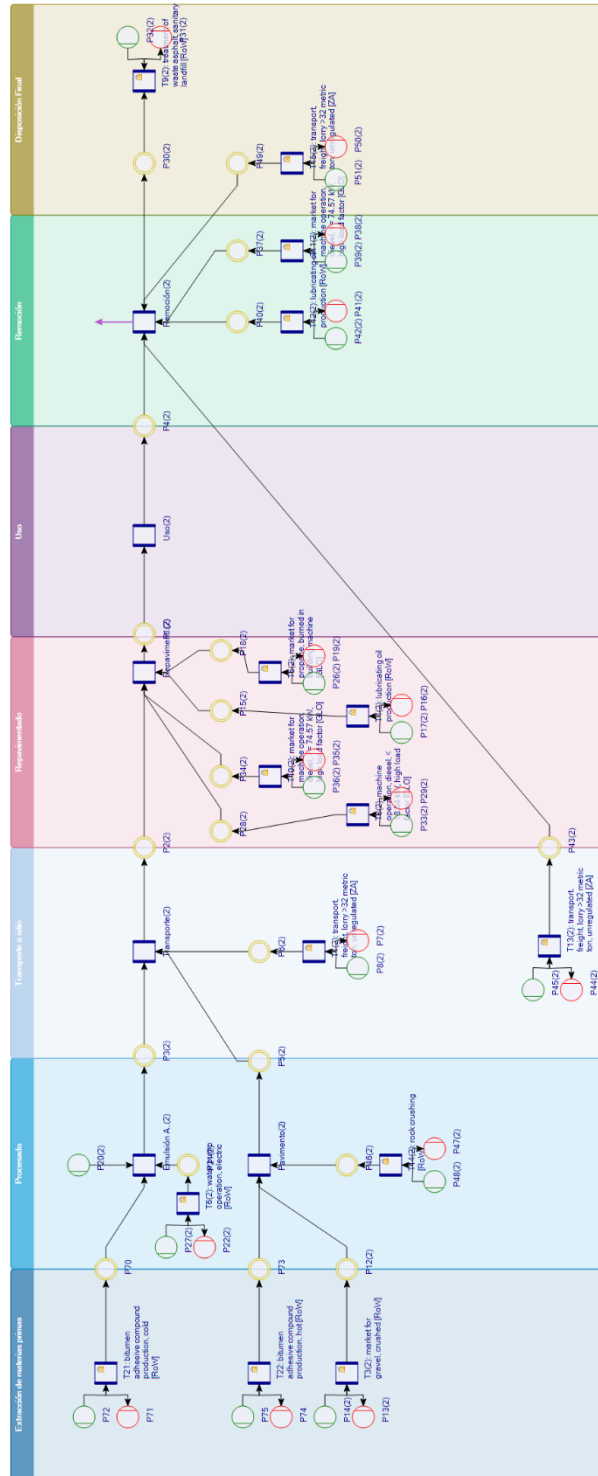
Filtros:	\$ 6.244,42
Costo de Propiedad:	\$ 47.225,83
Tarifa Directa Horaria:	\$ 139.096,09
Tarifa Directa Semanal:	\$ 3.036.656,23

Reparaciones:	\$ 27.329,76
Costo de Operación:	\$ 82.780,26
Tarifa Directa Diaria:	\$ 936.043,82
Tarifa Directa Mensual:	\$ 10.628.296,82

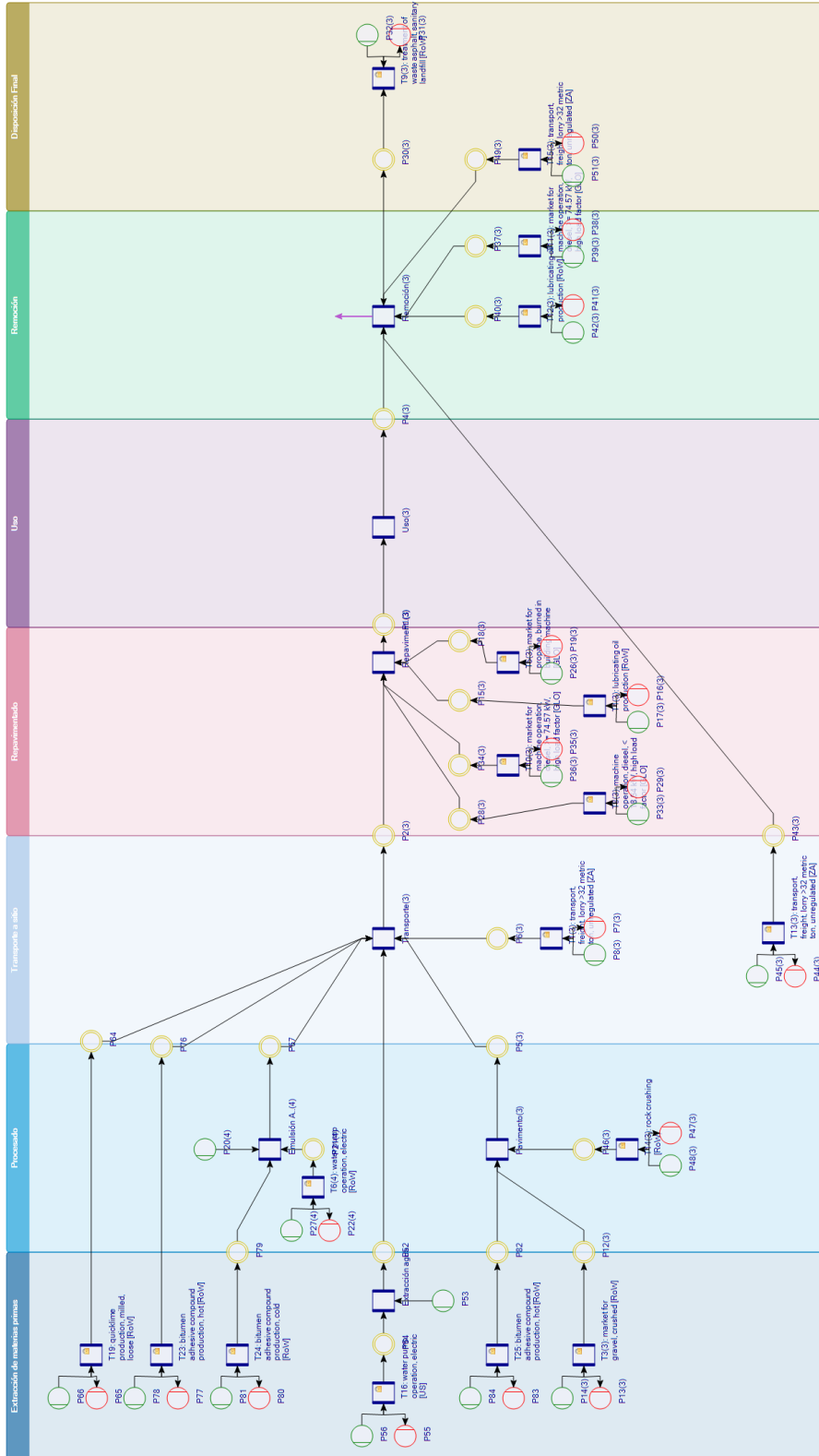
APÉNDICE 11: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DE ESCENARIO BASE EN UMBERTO



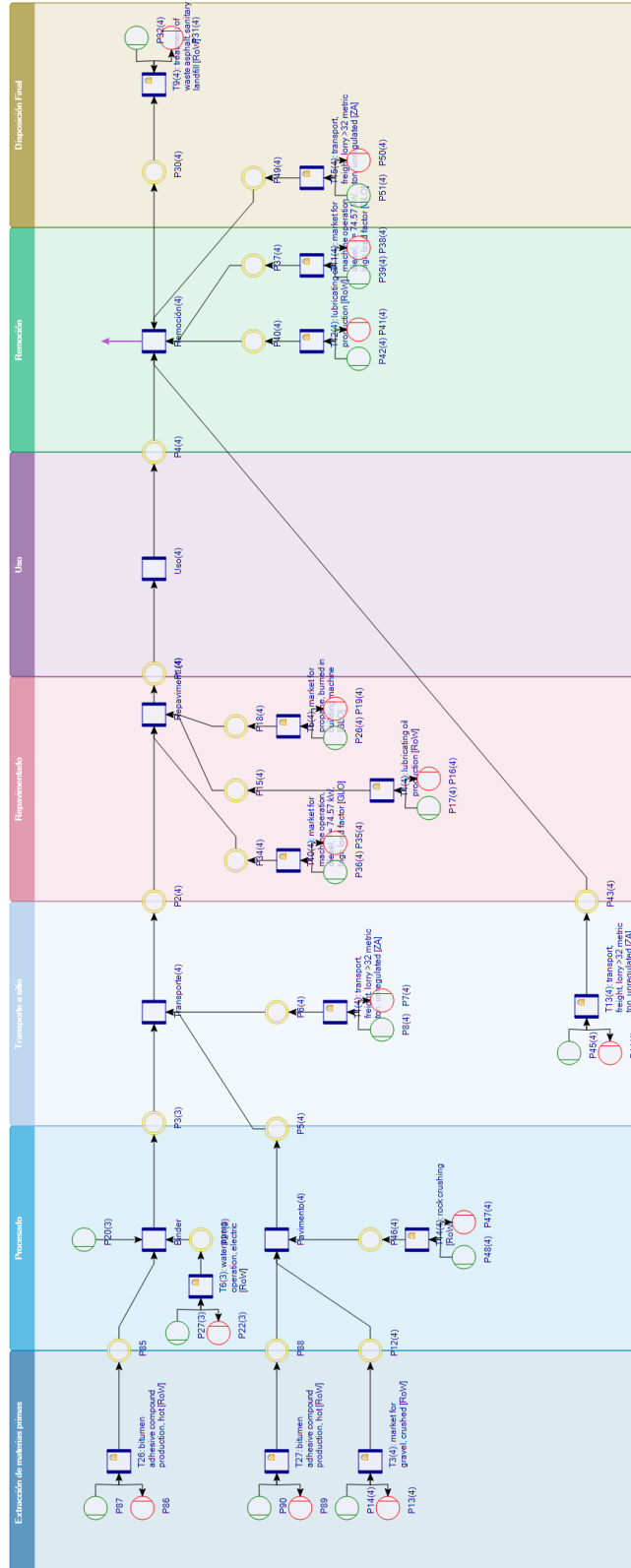
APÉNDICE 12: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESCENARIO 1 EN UMBERTO



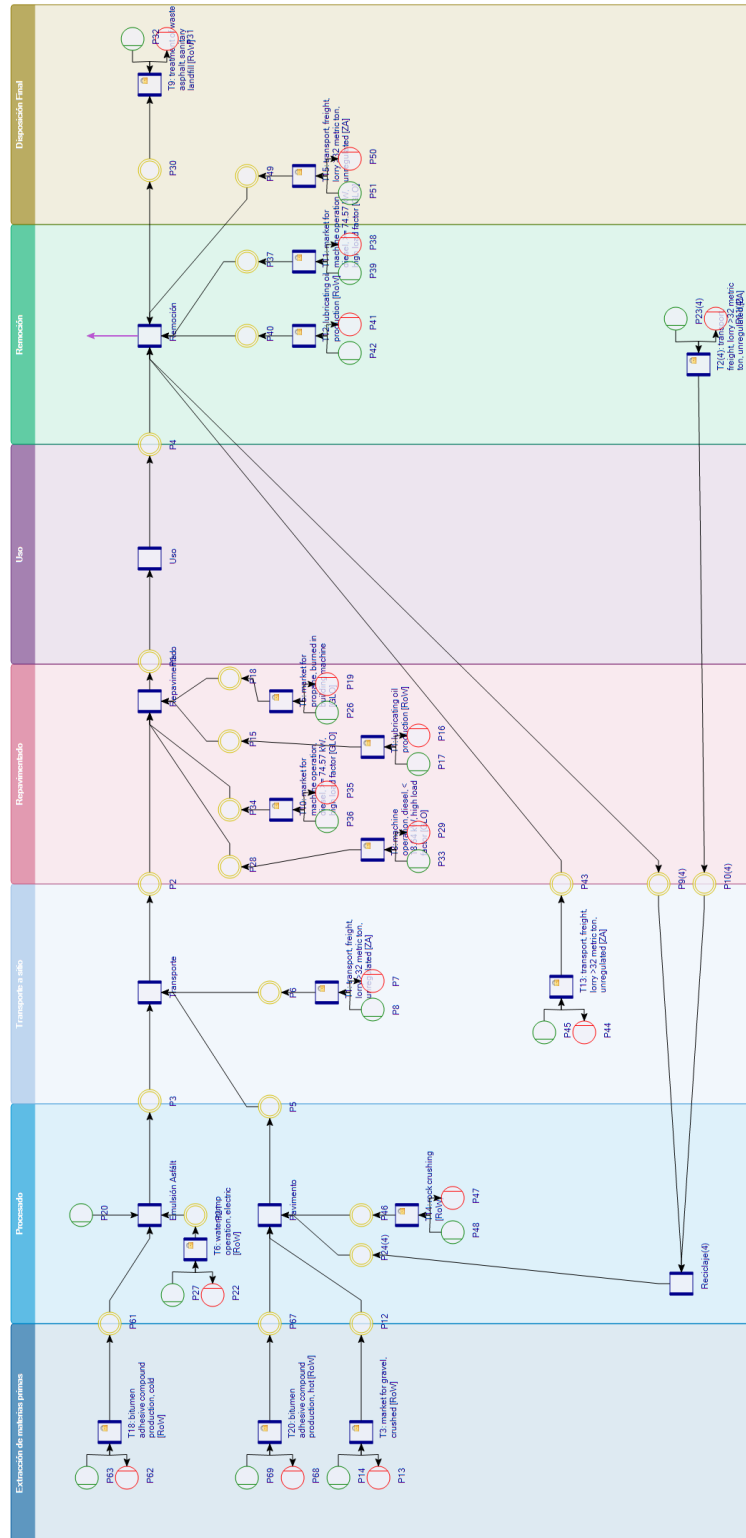
APÉNDICE 13: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESCENARIO 2 EN UMBERTO



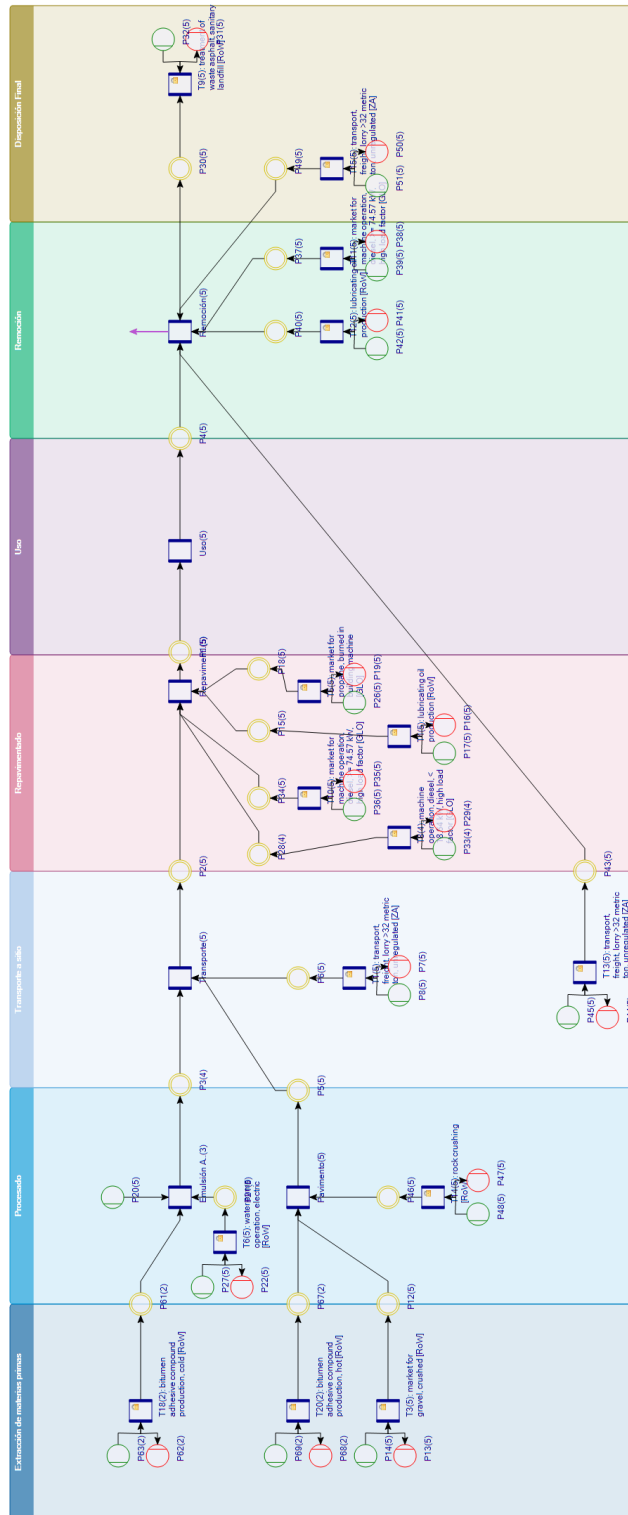
APÉNDICE 14: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESCENARIO 3 EN UMBERTO



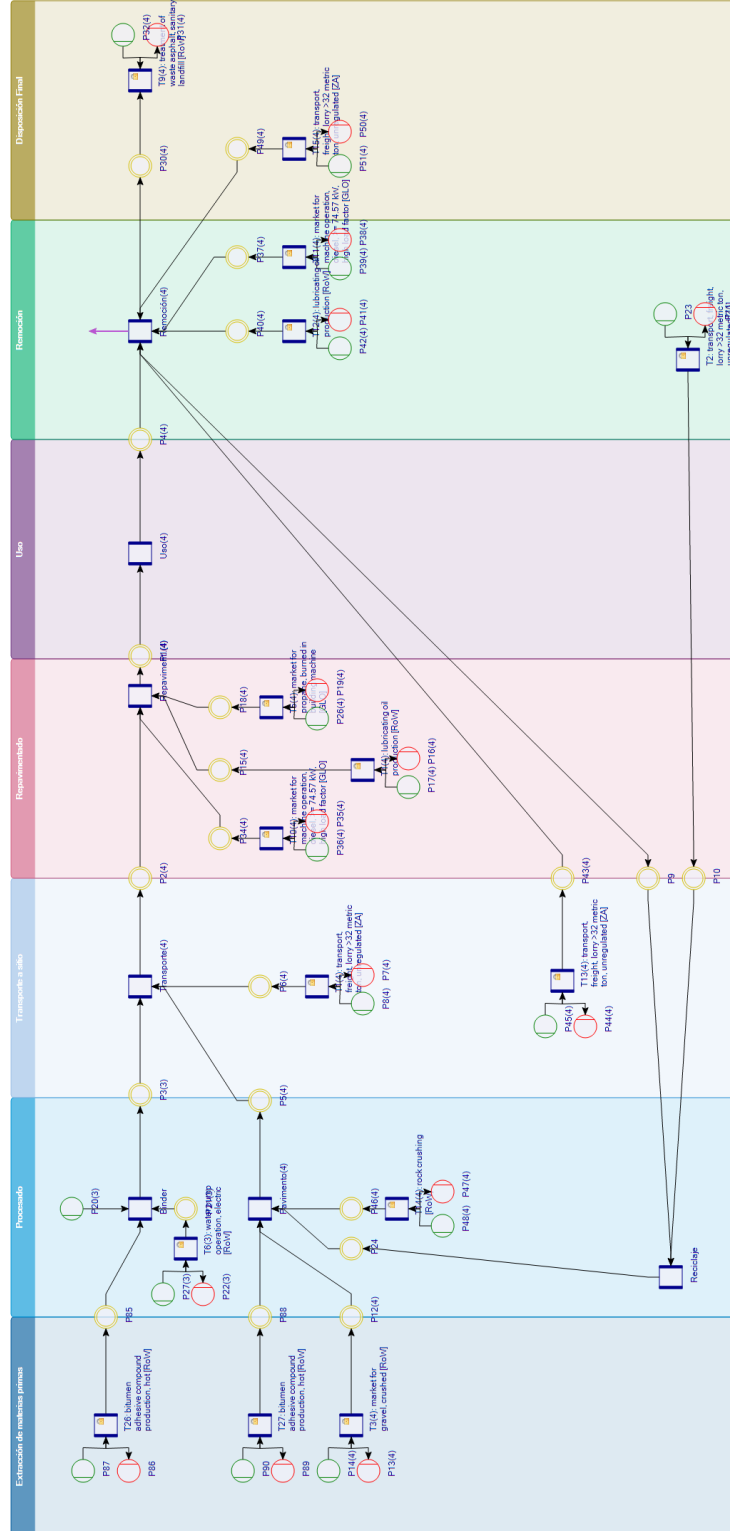
APÉNDICE 15: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESCENARIO BASE CON RECICLAJE PARCIAL EN UMBERTO



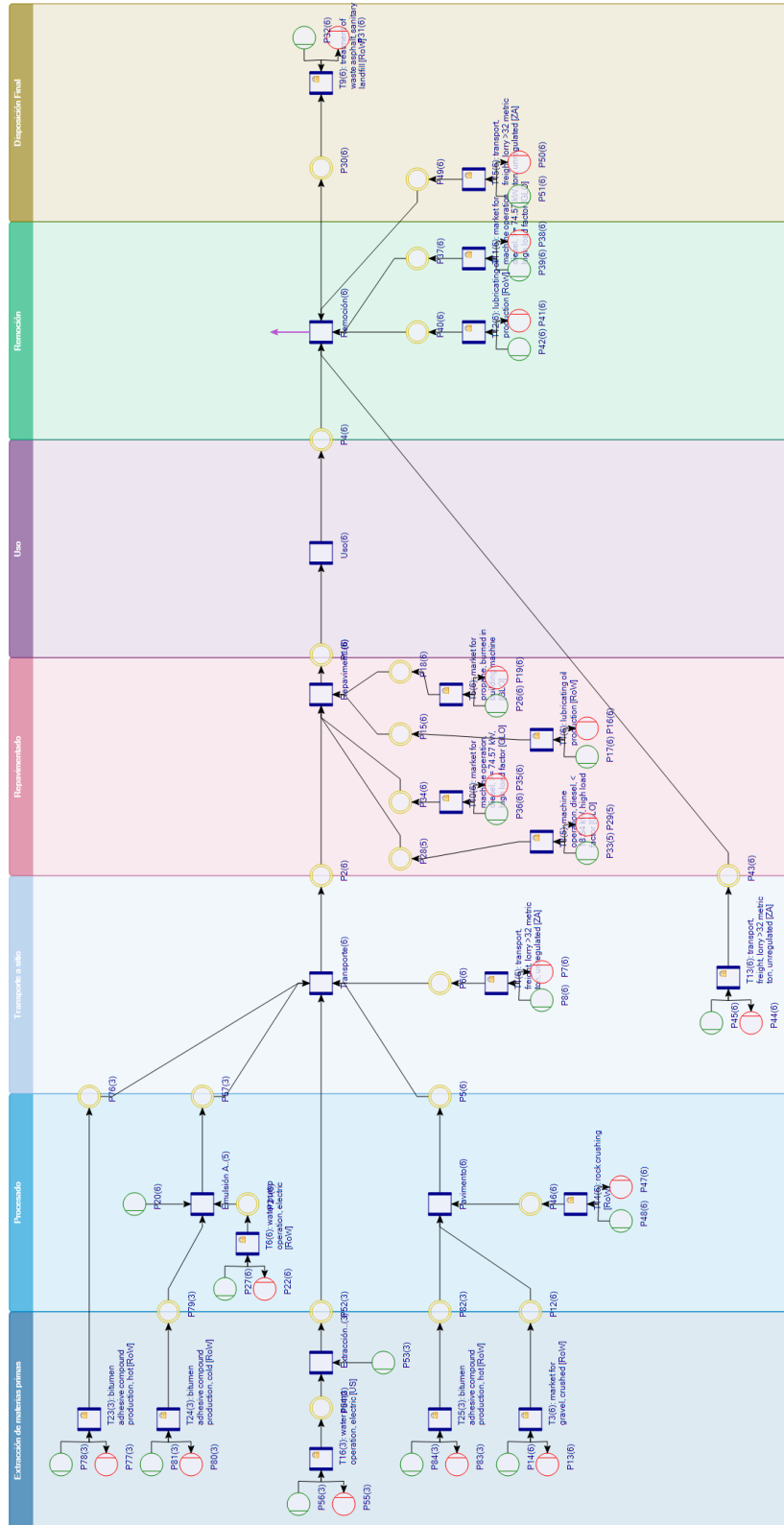
APÉNDICE 16: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESCENARIO 1 CON RECICLAJE PARCIAL EN UMBERTO



APÉNDICE 18: DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL ESCENARIO 3 CON RECICLAJE PARCIAL EN UMBERTO



APÉNDICE 20: DIAGRAMA DE MODELACIÓ DEL ESCENARIO 2 CON 0% DE CAL EN UMBERTO



APÉNDICE 21: RESULTADOS POR CATEGORÍA DE IMPACTO PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación, se muestran los resultados de manera gráfica y en tablas para las siete categorías de impacto para los análisis de sensibilidad de reciclaje parcial y de disminución en el uso de Cal.

Inclusión de reciclaje parcial en los escenarios

cambio climático

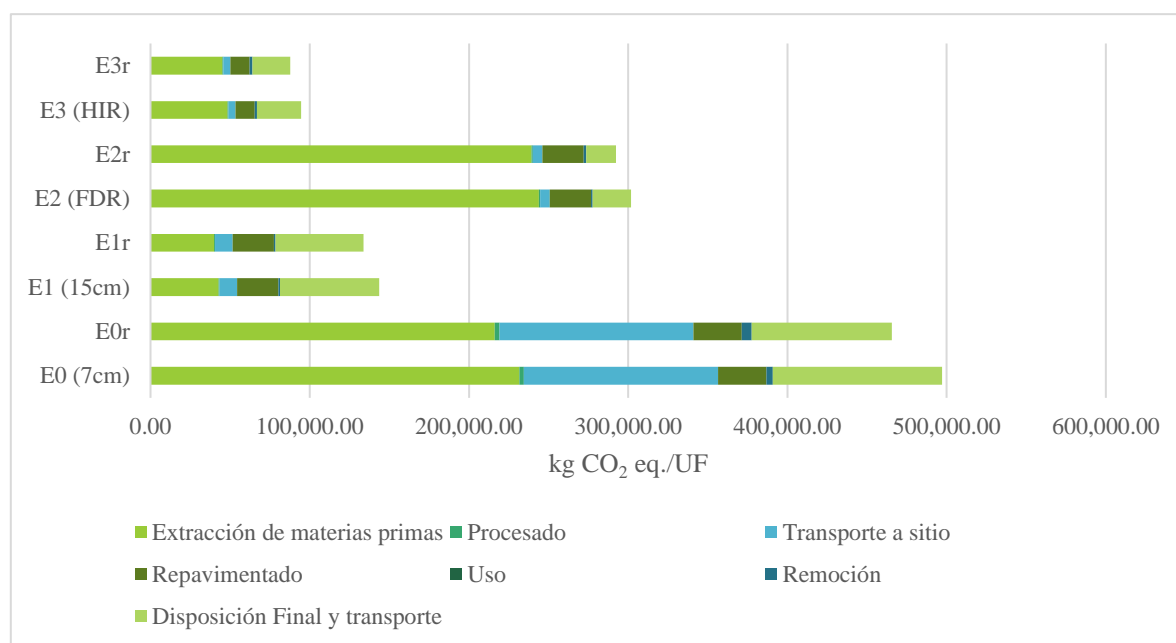


Figura 47. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático.

Tabla 50. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático, en kg CO₂ eq.

Etapas de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	231,681	216,244	42,784	39,948	243,929	239,298	48,361	45,053
Procesado	2,856	2,856	525	525	857	857	612	612
Transporte a sitio	121,928	121,928	11,075	11,075	5,955	5,955	4,483	4,483

Tratamiento de rehabilitación	30,266	30,266	25,932	25,932	25,938	25,938	12,019	12,019
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	4,000	6,216	1,092	1,092	910	1,574	1,454	1,929
Disposición final y transporte	106,426	88,101	62,197	55,293	24,188	18,690	27,643	23,716
Total	497,157	465,611	143,604	133,865	301,776	292,312	94,572	87,813
Comparación porcentual	100%	94%	29%	27%	61%	59%	19%	18%

Tabla 51. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático

Etapas de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	1%
Procesado	25%	26%	8%	8%	2%	2%	5%	5%
Transporte a sitio	6%	7%	18%	19%	9%	9%	13%	14%
Tratamiento de rehabilitación	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Uso	1%	1%	1%	1%	0%	1%	2%	2%
Remoción	21%	19%	43%	41%	8%	6%	29%	27%
Disposición final y transporte	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Sumatoria	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	1%

Acidificación terrestre

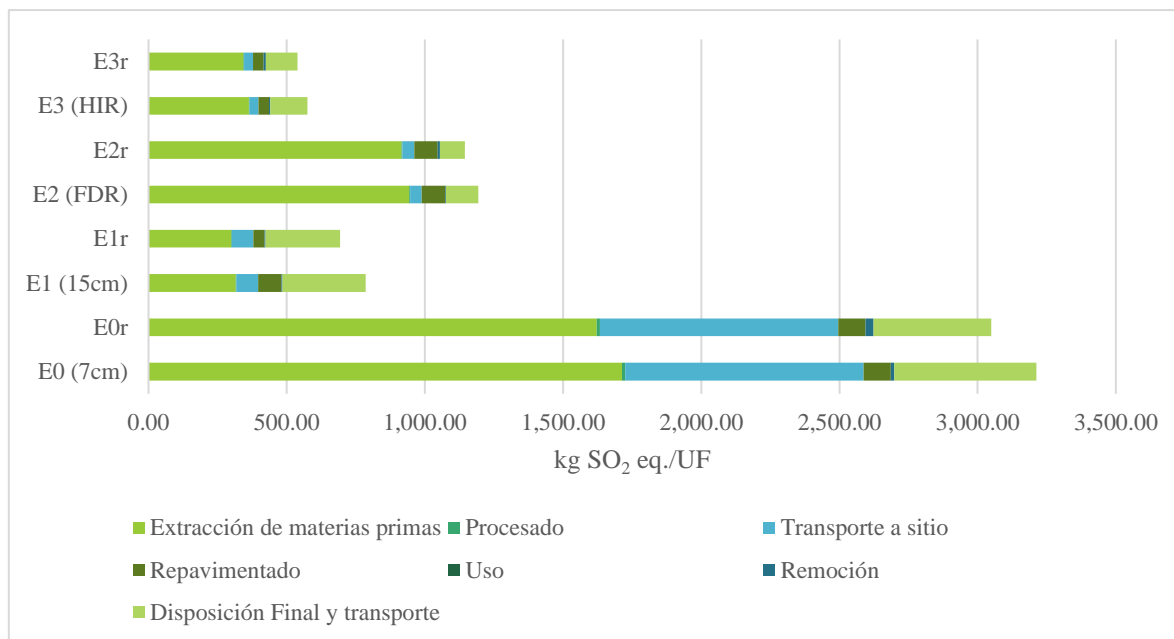


Figura 48. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.

Tabla 52. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre, en kg SO₂ eq.

Etapa de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	1,713	1,622	316	299	943	916	363	344
Procesado	11.14	11.14	2.05	2.05	3.34	3.34	2.39	2.39
Transporte a sitio	862	862	78.33	78.33	42.12	42.12	31.71	31.71
Tratamiento de rehabilitación	98.93	98.93	84.75	40.23	84.78	84.78	38.94	38.94
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	13.09	28.76	3.57	3.57	2.98	7.68	4.76	8.12
Disposición final y transporte	514	426	300	269	117	90.27	134	115
Total	3,213	3,049	785	693	1,193	1,144	575	540
Comparación porcentual	100%	95%	24%	22%	37%	36%	18%	17%

Tabla 53. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre

Etapa de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	53%	53%	40%	43%	79%	80%	63%	64%

Procesado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	27%	28%	10%	11%	4%	4%	6%	6%
Tratamiento de rehabilitación	3%	3%	11%	6%	7%	7%	7%	7%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	1%	0%	1%	0%	1%	1%	2%
Disposición final y transporte	16%	14%	38%	39%	10%	8%	23%	21%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Formación de oxidantes fotoquímicos

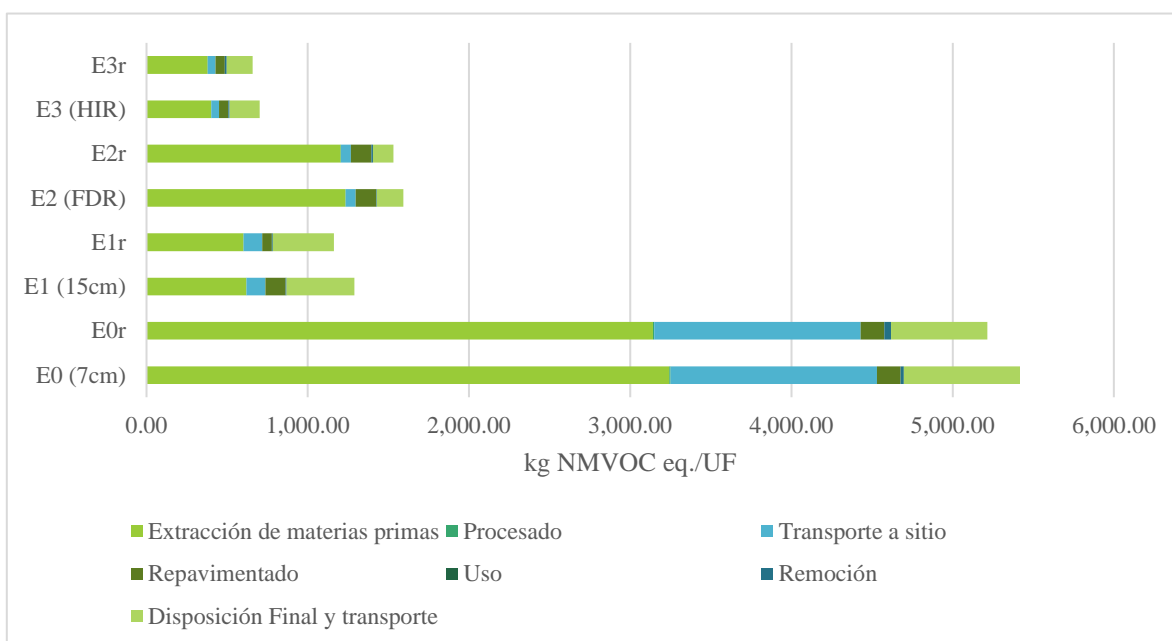


Figura 49. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.

Tabla 54. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en kg NMVOC eq.

Etapa de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	3,243	3,141	619	601	1,234	1,203	401	379
Procesado	7.79	7.79	1.43	1.43	2.34	2.34	1.67	1.67
Transporte a sitio	1,280	1,280	116	116	62.50	62.50	47.06	47.06
Tratamiento de rehabilitación	147	147	126	59.82	126	126	57.76	57.76
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	19.52	42.78	5.33	5.33	4.44	11.42	7.10	12.08

Disposición final y transporte	721	597	422	378	164	127	187	161
Total	5,418	5,216	1,290	1,162	1,593	1,532	702	659
Comparación porcentual	100%	96%	24%	21%	29%	28%	13%	12%

Tabla 55. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos

Etapas de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	60%	60%	48%	52%	77%	79%	57%	58%
Procesado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	24%	25%	9%	10%	4%	4%	7%	7%
Tratamiento de rehabilitación	3%	3%	10%	5%	8%	8%	8%	9%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	2%
Disposición final y transporte	13%	11%	33%	33%	10%	8%	27%	24%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Agotamiento de recursos fósiles

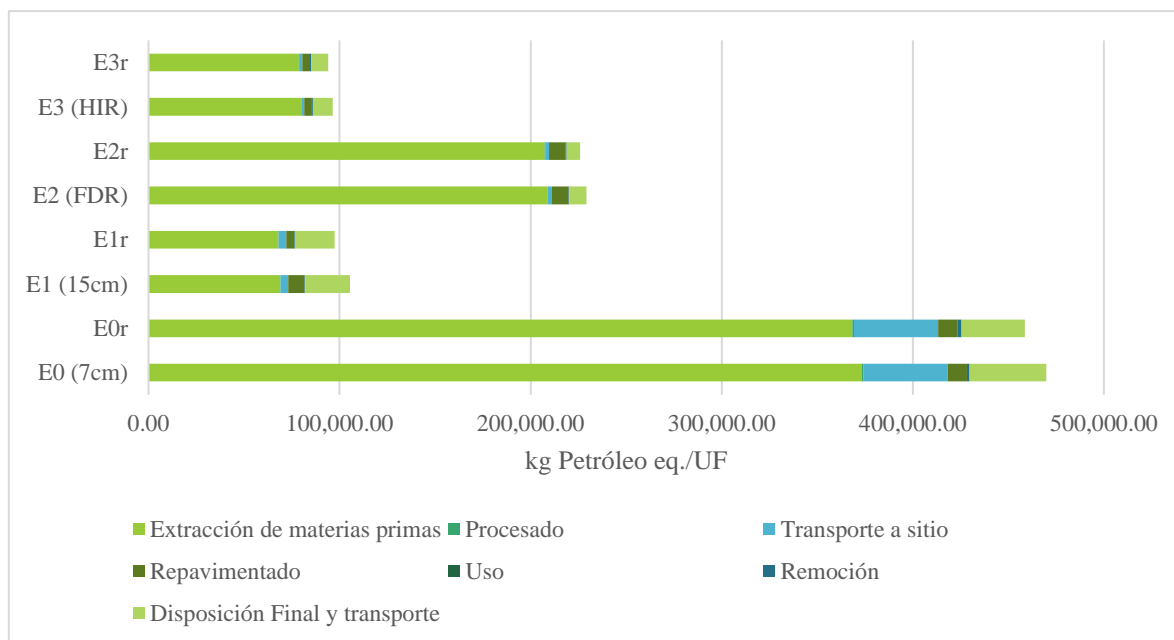


Figura 50. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.

Toxicidad humana

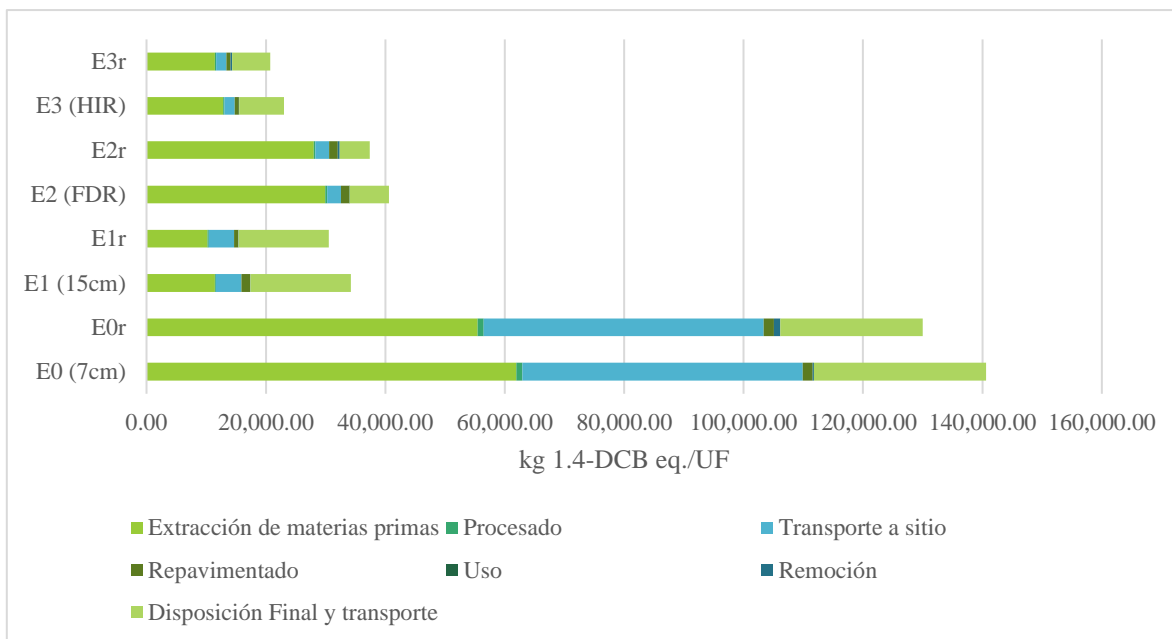


Figura 51. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.

Tabla 58. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana, en kg 1.4-DCB eq.

Etapa de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	61,942	55,437	11,435	10,240	29,949	27,997	12,837	11,443
Procesado	1,018	1,018	187	187	305	305	218	218
Transporte a sitio	46,922	46,922	4,262	4,262	2,292	2,292	1,726	1,726
Tratamiento de rehabilitación	1,681	1,681	1,439	684	1,441	1,441	670	670
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	224	1,077	61	61	51	307	81	264
Disposición final y transporte	28,801	23,842	16,832	15,072	6,546	5,058	7,481	6,418
Total	140,587	129,976	34,216	30,506	40,584	37,400	23,013	20,739
Comparación porcentual	100%	92%	24%	22%	29%	27%	16%	15%

Tabla 59. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana

Etapa de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
-------------	----	----------------	----	----------------	----	----------------	----	----------------

Remoción	0.14	0.68	0.04	0.04	0.03	0.19	0.05	0.17
Disposición final y transporte	12.85	10.64	7.51	6.79	2.92	2.26	3.34	2.86
Total	97.45	88.91	21.07	18.62	28.23	25.67	15.89	14.06
Comparación porcentual	100%	91%	22%	19%	29%	26%	16%	14%

Tabla 61. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce

Etapa de CV	E0	E0 + reciclaje	E1	E1 + reciclaje	E2	E2 + reciclaje	E3	E3 + reciclaje
Extracción de materias primas	54%	51%	46%	45%	80%	80%	67%	66%
Procesado	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	2%
Transporte a sitio	30%	33%	13%	14%	5%	6%	7%	8%
Tratamiento de rehabilitación	1%	1%	4%	2%	3%	4%	3%	3%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	1%
Disposición final y transporte	13%	12%	36%	36%	10%	9%	21%	20%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Agotamiento de recursos Hídricos

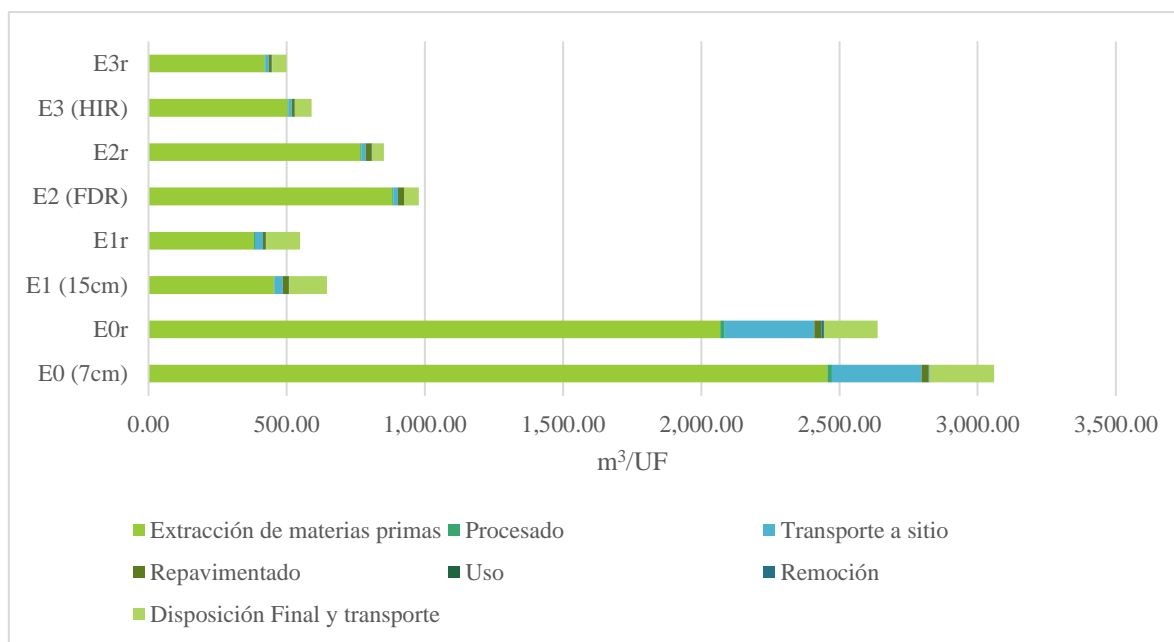


Figura 53. Contribución de análisis de sensibilidad de reciclaje parcial por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos.

Disminución de uso de cal en el Escenario 2

cambio climático

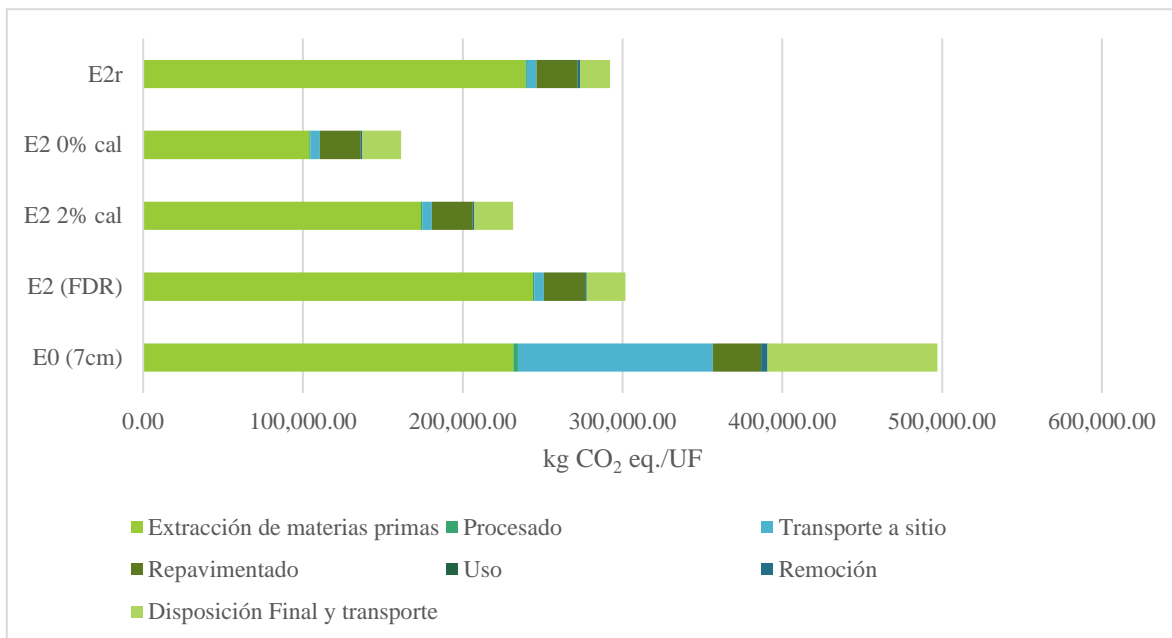


Figura 54. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Cambio Climático.

Tabla 64. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático, en kg CO₂ eq.

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	231,681	243,929	173,943	103,958	239,298
Procesado	2,856	857	857	857	857
Transporte a sitio	121,928	5,956	5,825	5,695	5,955
Tratamiento de rehabilitación	30,266	25,938	25,758	25,758	25,938
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	4,000	910	910	910	1,574

Disposición final y transporte	106,426	24,188	24,188	24,188	18,690
Total	497,157.17	301,775.97	231,480.27	161,364.72	292,312.21
Comparación porcentual	100%	61%	47%	32%	59%

Tabla 65. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de cambio climático

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	47%	81%	75%	64%	82%
Procesado	1%	0%	0%	1%	0%
Transporte a sitio	25%	2%	3%	4%	2%
Tratamiento de rehabilitación	6%	9%	11%	16%	9%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	1%	0%	0%	1%	1%
Disposición final y transporte	21%	8%	10%	15%	6%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Acidificación terrestre

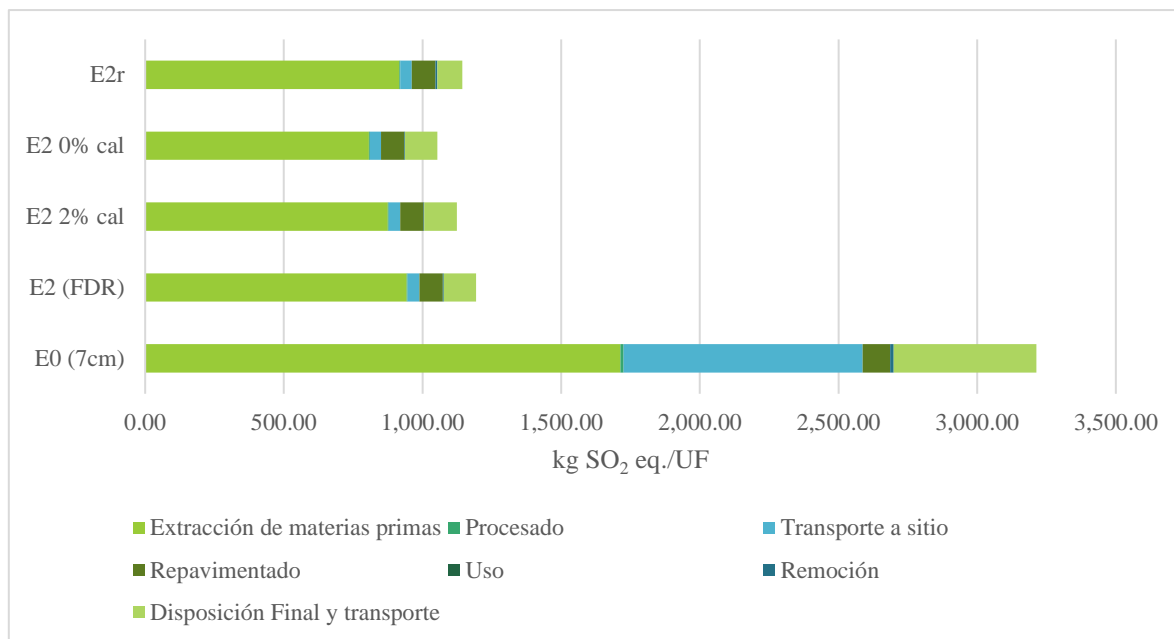


Figura 55. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre.

Tabla 66. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre, en kg SO₂ eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpelado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	1,713	943	875	806	916
Procesado	11.14	3.34	3.34	3.34	3.34
Transporte a sitio	862	42.12	41.20	40.28	42.12
Tratamiento de rehabilitación	98.93	84.78	84.19	84.19	84.78
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	13.09	2.98	2.98	2.98	7.68
Disposición final y transporte	514	117	117	117	90.27
Total	3,213	1,193	1,123	1,054	1,144

Comparación porcentual	100%	37%	35%	33%	36%
-------------------------------	------	-----	-----	-----	-----

Tabla 67. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Acidificación Terrestre

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	53%	79%	78%	77%	80%
Procesado	0%	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	27%	4%	4%	4%	4%
Tratamiento de rehabilitación	3%	7%	7%	8%	7%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	16%	10%	10%	11%	8%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Formación de oxidantes fotoquímicos

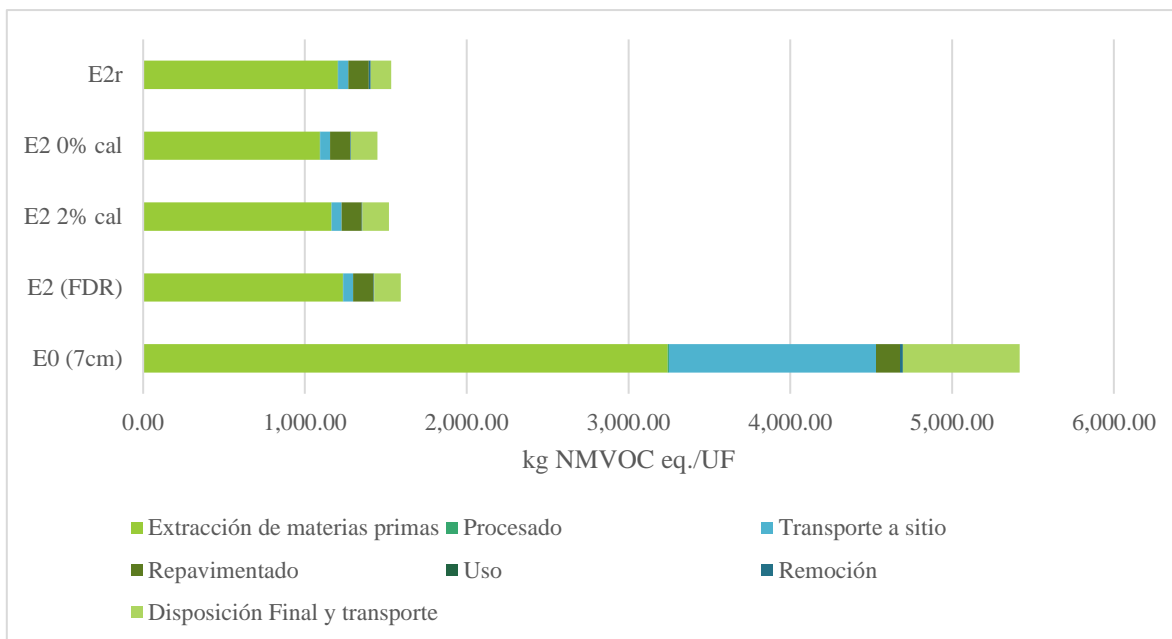


Figura 56. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos.

Tabla 68. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos, en kg NMVOC eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	3,243	1,234	1,163	1,092	1,203
Procesado	7.79	2.34	2.34	2.34	2.34
Transporte a sitio	1,280	62.50	61.14	59.78	62.50
Tratamiento de rehabilitación	147	126	125	125	126
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	19.52	4.44	4.44	4.44	11.42
Disposición final y transporte	721	164	164	164	127
Total	5,418	1,593	1,520	1,448	1,532
Comparación porcentual	100%	29%	28%	27%	28%

Tabla 69. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Formación de Oxidantes Fotoquímicos

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	60%	77%	77%	75%	79%
Procesado	0%	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	24%	4%	4%	4%	4%
Tratamiento de rehabilitación	3%	8%	8%	9%	8%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	13%	10%	11%	11%	8%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Agotamiento de recursos fósiles

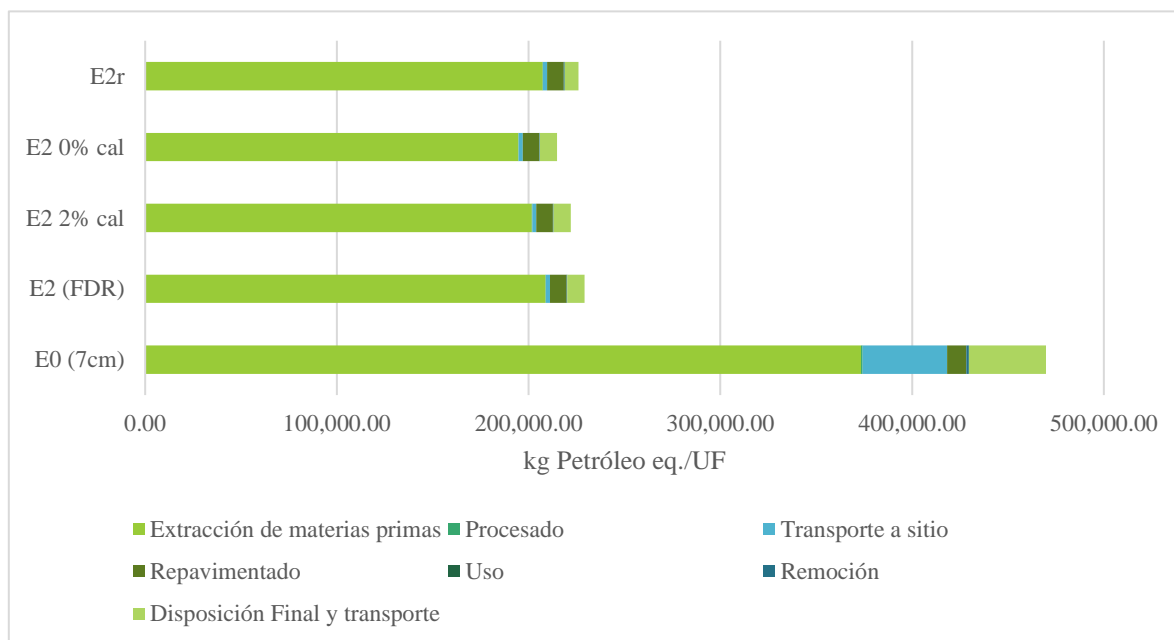


Figura 57. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles.

Tabla 70. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles, en kg Petr6leo eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
-------------	------------------------------------	-----------------------------	-----------	-----------	----------------

Extracción de materias primas	373,414	208,786	201,686	194,585	207,302
Procesado	807	242	242	242	242
Transporte a sitio	44,011	2,150	2,103	2,056	2,150
Tratamiento de rehabilitación	10,064	8,626	8,566	8,566	8,626
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	1,334	304	304	304	543
Disposición final y transporte	40,174	9,130.	9,130.	9,130	7,055
Total	469,805	229,238	222,031	214,884	225,918
Comparación porcentual	100%	49%	47%	46%	48%

Tabla 71. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	79%	91%	91%	91%	92%
Procesado	0%	0%	0%	0%	0%
Transporte a sitio	9%	1%	1%	1%	1%
Tratamiento de rehabilitación	2%	4%	4%	4%	4%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	0%
Disposición final y transporte	9%	4%	4%	4%	3%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Toxicidad humana

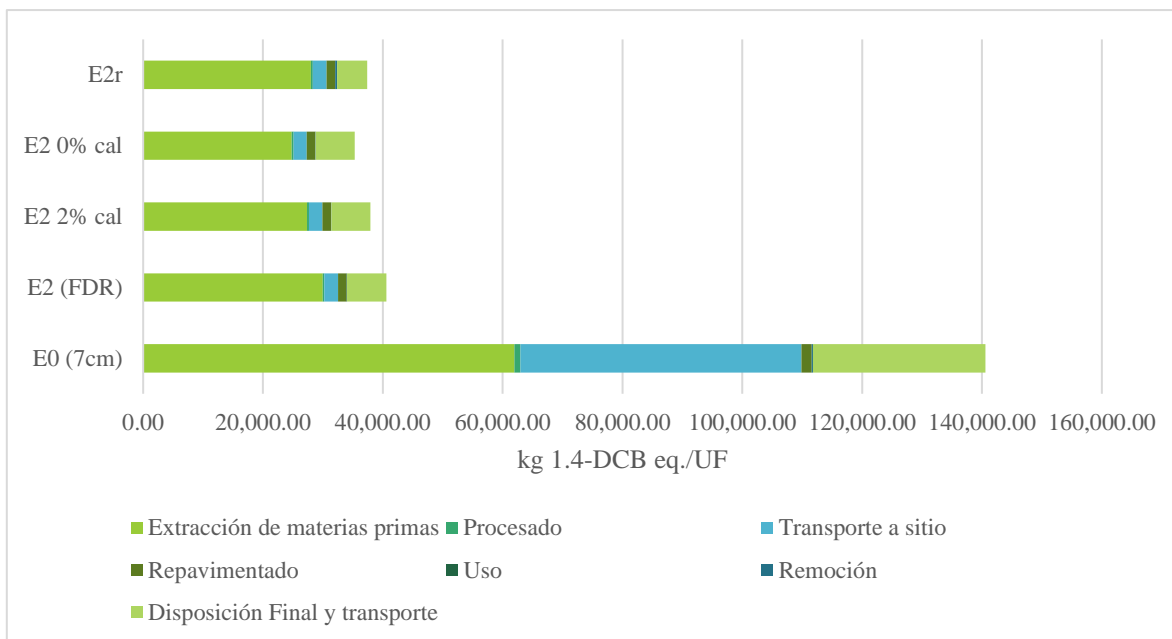


Figura 58. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana.

Tabla 72. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana, en 1.4-DCB eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	61,942	29,949	27,372	24,796	27,997
Procesado	1,018	305	305	305	305
Transporte a sitio	46,922	2,292	2,242	2,192	2,292
Tratamiento de rehabilitación	1,681	1,441	1,431	1,431	1,441
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	224	50.91	50.91	50.91	307
Disposición final y transporte	28,801	6,546	6,546	6,546	5,058
Total	140,587	40,584	37,947	35,321	37,400
Comparación porcentual	100%	29%	27%	25%	27%

Tabla 73. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de toxicidad humana

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	44%	74%	72%	70%	75%
Procesado	1%	1%	1%	1%	1%
Transporte a sitio	33%	6%	6%	6%	6%
Tratamiento de rehabilitación	1%	4%	4%	4%	4%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	20%	16%	17%	19%	14%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Eutrofización de agua dulce

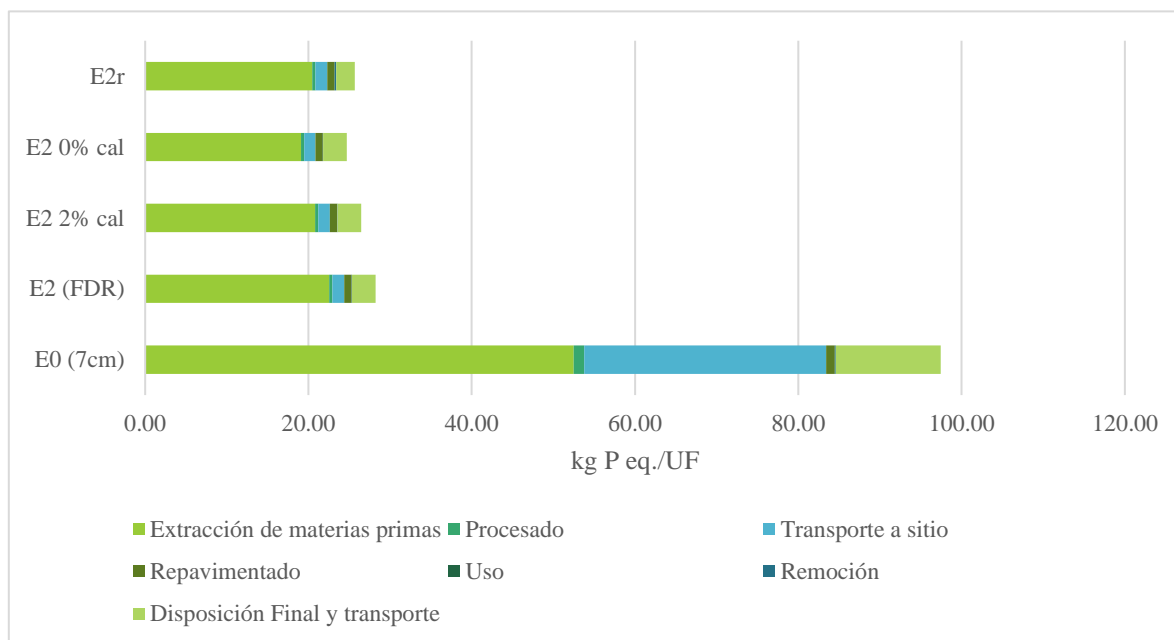


Figura 59. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce.

Tabla 74. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce, en kg P eq.

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	44%	74%	72%	70%	75%
Procesado	1%	1%	1%	1%	1%
Transporte a sitio	33%	6%	6%	6%	6%
Tratamiento de rehabilitación	1%	4%	4%	4%	4%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	20%	16%	17%	19%	14%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Extracción de materias primas	52.48	22.54	20.81	19.08	20.48
Procesado	1.30	0.39	0.39	0.39	0.39
Transporte a sitio	29.63	1.45	1.42	1.38	1.45
Tratamiento de rehabilitación	1.05	0.90	0.90	0.90	0.90
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0.14	0.03	0.03	0.03	0.19
Disposición final y transporte	12.85	2.92	2.92	2.92	2.26
Total	97.45	28.23	26.47	24.70	25.67
Comparación porcentual	100%	29%	27%	25%	26%

Tabla 75. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Eutrofización de Agua Dulce

Etapas de CV	E0. Fresado parcial y reencarpelado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	54%	80%	79%	77%	80%
Procesado	1%	1%	1%	2%	2%
Transporte a sitio	30%	5%	5%	6%	6%
Tratamiento de rehabilitación	1%	3%	3%	4%	4%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	1%
Disposición final y transporte	13%	10%	11%	12%	9%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%

Agotamiento de recursos Hídricos

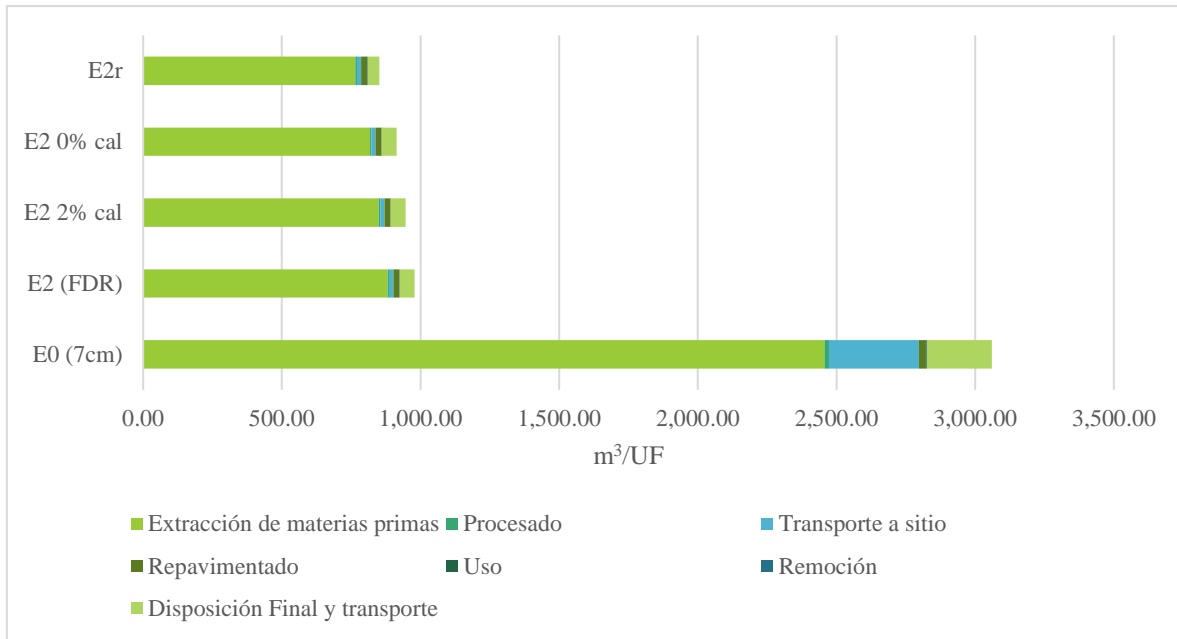


Figura 60. Contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos.

Tabla 76. Tabulación de contribución de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos, en m³

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpchado	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	2,457	882	850	818	766
Procesado	15.57	4.67	4.67	4.67	4.67
Transporte a sitio	325	15.86	15.51	15.16	15.86
Tratamiento de rehabilitación	25.56	21.92	21.76	21.76	21.91
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	3.41	0.78	0.78	0.78	2.55
Disposición final y transporte	234	53.23	53.23	53.23	41.13
Total	3,060	978	946	913	852
Comparación porcentual	100%	32%	31%	30%	28%

Tabla 77. Tabulación de contribución porcentual de análisis de sensibilidad de uso de cal por etapas al impacto total en la categoría de Agotamiento de Recursos Hídricos

Etapa de CV	E0. Fresado parcial y reencarpetao	E2. Reciclaje en frío (FDR)	E2 2% cal	E2 0% cal	E2 + reciclaje
Extracción de materias primas	80%	90%	90%	90%	90%
Procesado	1%	0%	0%	1%	1%
Transporte a sitio	11%	2%	2%	2%	2%
Tratamiento de rehabilitación	1%	2%	2%	2%	3%
Uso	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Remoción	0%	0%	0%	0%	0%
Disposición final y transporte	8%	5%	6%	6%	5%
Sumatoria	100%	100%	100%	100%	100%