

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



CONSUMO DE ENERGÍA, ÁRIDOS Y PRODUCCIÓN DE CO₂ EN LA CONSTRUCCIÓN
DE CAMINOS FORESTALES DE EXPLOTACIÓN

MARCELO CRISTIAN GAJARDO VARGAS

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Álvaro González Vaccarezza

Profesor Co-referente
Alelí Osorio Lird

2019

AGRADECIMIENTOS

¡Gracias a todos!

RESUMEN

Los caminos productivos son aquellos que están ligados íntimamente a un sector de la economía. En general, se tratan de caminos no pavimentados y de bajo volumen de tránsito, es decir, tienen un tránsito inferior a 400 vehículos por día. Sin embargo, los vehículos llevan una carga máxima y las condiciones de operación suelen ser desfavorables.

En Chile un ejemplo son los caminos forestales, los cuales consisten en una capa de material granular sobre la subrasante existente, se construyen generalmente en la temporada de verano, y luego se operan en invierno durante el período de cosecha con vehículos cargados a capacidad máxima. La solución de carpeta granular sobre suelo existente históricamente ha dado buenos resultados en el sector forestal, sin embargo, dadas las nuevas restricciones ambientales, cada vez es más difícil y costoso el recurso árido.

El costo del árido es directamente relacionado con la distancia de transporte, es decir, la distancia que tenga que recorrer un camión desde el lugar de construcción hasta el pozo de árido más cercano. En ocasiones, debido a la escasez de pozos, el árido debe ser transportado en distancias de más de 30 km hasta el lugar de la obra. Por este motivo, surgen alternativas como la estabilización química de suelos, la cual busca mejorar la calidad de los materiales existente en la obra, reduciendo la cantidad de material granular a utilizar y por lo tanto el impacto ambiental de la construcción.

El presente trabajo cuantifica el consumo de energía y producción de CO₂ en la construcción de caminos forestales de explotación, para evaluar los tipos de soluciones a utilizar en la construcción de caminos forestales (tradicional o con la utilización de agentes estabilizadores) de acuerdo a factores que intervienen en el diseño de un camino como: volumen de madera a transportar, clima, tipo de suelo de subrasante, materiales, etc. A través de un modelo general basado en el consumo de energía, emisiones de CO₂ a la atmósfera, y cantidad de material granular a utilizar.

Los resultados de la investigación permiten concluir que los caminos forestales contruidos bajo el diseño de una carpeta granular sobre suelo existente presentan un menor consumo energético para distancias de transporte de material granular menores a

30 km, en suelos con capacidad de soporte mayores a 3%, sin importar la cantidad de volumen de madera a transportar. Además, comparativamente presentan una menor cantidad de emisión de CO₂ a la atmósfera, y un mayor consumo de áridos.

ABSTRACT

The productive roads are those that are intimately linked to a sector of the economy. In general, they are unpaved roads with low traffic volume, that is, they have a traffic of less than 400 vehicles per day. However, vehicles carry a maximum load and operating conditions are often unfavorable.

In Chile an example is the forest roads, which consist of a layer of granular material on the existing subgrade, are generally built on the summer season, and then operate in winter during the harvest period with vehicles loaded to maximum capacity. The solution of granular folder on existing ground historically has given good results in the forest sector, nevertheless, given the new environmental restrictions, it is increasingly difficult and cost the arid resource.

The cost of the aggregate is directly related to the distance of transport, that is, the distance a truck has to travel from the construction site to the nearest arid well. Sometimes, due to the scarcity of wells, the aggregate must be transported over distances of more than 30 km to the site of the work. For this reason, alternatives arise as the chemical stabilization of soils, which seeks to improve the quality of existing materials in the work, reducing the amount of granular material to be used and therefore the environmental impact of the construction.

The present work quantifies the consumption of energy and CO₂ production in the construction of forest exploitation roads, to evaluate the types of solutions to be used in the construction of forest roads (traditional or with the use of stabilizing agents) according to factors that They intervene in the design of a road such as: volume of wood to be transported, climate, type of subgrade soil, materials, etc. Through a general model based on energy consumption, CO₂ emissions to the atmosphere, and amount of granular material to be used.

The results of the investigation allow to conclude that the forest roads built under the granular folder design on existing soil have a lower energy consumption for transport distances of granular material smaller than 30 km, in soils with support capacity greater than 3%, regardless of the amount of volume of wood to be transported. In addition, they

have a comparatively lower amount of CO₂ emissions into the atmosphere, and a greater consumption of aggregates.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	IV
INDICE GENERAL	VI
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS	X
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1.1 INDUSTRIA FORESTAL	1
1.1.2 CUANTIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA CONSUMIDA, EMANACIÓN DE CO ₂ Y UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS CAMINOS FORESTALES.....	1
1.1.3 INDUSTRIA FORESTAL EN CHILE	2
1.1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	5
1.2.1 HIPÓTESIS	5
1.2.2 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	7
2 MARCO TEÓRICO	8
2.1 INDUSTRIA FORESTAL	8
2.1.1 OBJETIVOS DE LA INDUSTRIA FORESTAL	8
2.1.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MADERA	8
2.1.3 CAMINOS FORESTALES Y SU IMPORTANCIA.....	8
2.1.4 CONSTRUCCIÓN DE LOS CAMINOS FORESTALES	9
2.2 CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS.....	11
2.3 MÉTODO DE DISEÑO ESTRUCTURAL	12
2.3.1 MÉTODO SUDAFRICANO.....	12
2.3.2 MODELO DE DETERIORO PARA EL MATERIAL GRANULAR.....	13
2.3.3 MODELO DE DETERIORO PARA EL MATERIAL DE LA SUBRASANTE	14
2.4 ESTABILIZACIÓN DE LOS Suelos	15
2.5 CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS MATERIALES UTILIZADOS - FACTORES DE CONVERSIÓN.....	15
2.5.1 CONSUMO DE ENERGÍA EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE CAMINOS FORESTALES DE EXPLOTACIÓN	15
2.6 REDES NEURONALES APLICADAS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS	16
3 MÉTODO GENERAL DE ANÁLISIS.....	18
3.1 INTRODUCCIÓN	18
3.2 ESTRUCTURAS DE CAMINO A Evaluar	20
3.3 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL.....	21
3.3.1 TRÁNSITO O VOLUMEN DE MADERA.....	21
3.3.2 CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE	25
3.3.3 EFECTOS DEL CLIMA.....	28

4	REDES NEURONALES ARTIFICIALES – RNAS	30
4.1	REDES NEURONALES ARTIFICIALES	30
4.2	COMPONENTES BÁSICOS DE UNA NEURONA ARTIFICIAL	31
4.3	ARQUITECTURA DE UNA RED NEURONAL	33
4.4	ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL	34
4.5	CRITERIOS DE DETENCIÓN	35
4.6	SOFTWARE A UTILIZAR	36
4.7	IMPLEMENTACIÓN EN EXCEL	37
5	MODELO de evaluación del proceso constructivo	38
5.1	MODELAMIENTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO	38
5.1.1	PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS	38
5.1.2	TRANSPORTE DE ÁRIDOS	39
5.1.3	TRANSPORTE DE AGUA PARA COMPACTACIÓN	40
5.1.4	COLOCACIÓN BASE GRANULAR	42
5.1.5	PRODUCCIÓN DE CEMENTO	42
5.1.6	TRANSPORTE DE CEMENTO	43
5.1.7	ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE	43
6	Análisis de resultados	45
6.1	Energía requerida por cada tipo de solución estructural para diferentes condiciones EN CLIMA NORMAL	45
6.2	Producción de CO ₂ debida a los diferentes tipos de soluciones estructurales de caminos forestales en diferentes escenarios EN CLIMA NORMAL	56
6.3	Consumo de áridos debido a los diferentes tipos de soluciones estructurales de caminos forestales en diferentes escenarios en clima normal	63
6.4	Energía requerida por cada tipo de solución estructural para diferentes condiciones en clima lluvioso	70
6.5	Producción de CO ₂ debida a los diferentes tipos de soluciones estructurales de caminos forestales en diferentes escenarios	80
6.6	Consumo de áridos debido a los diferentes tipos de soluciones estructurales de caminos forestales en diferentes escenarios en clima lluvioso	86
7	CONCLUSIONES	94
8	REFERENCIAS	96

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Consumo industrial de madera 2017 (Modificado Gysling et al, 2018)	3
Figura 1.2 Mapa del número de industrias forestales en Chile (Gysling & Soto, 2018)	3
Figura 2.1 Clasificación de caminos (Douglas, 2016).....	9
Figura 2.2 Estructura de la solución tradicional (Adaptado González, 2018).....	10
Figura 2.3 Estructura de las soluciones alternativas (Adaptado González, 2018)	10
Figura 2.4 Procedimiento Iterativo del método sudamericano (Theyse, 1996)	13
Figura 3.1 Modelo de diseño y construcción de un camino forestal (Adaptado González, 2018)	19
Figura 3.2 Estructura de los caminos forestales (Adaptado González, 2018).....	20
Figura 3.3 Proceso de obtención del espesor de la base (Elaboración propia)	21
Figura 3.4 Representación de Eje Equivalente (Thenoux et al, 2002)	22
Figura 3.5 Camión ida (Adaptado González, 2018).....	23
Figura 3.6 Camión vuelta (Adaptado González, 2018).....	24
Figura 3.7 Modelo bicapa de la subrasante (González, 2018).....	26
Figura 4.1 Neurona biológica (Elaboración propia)	30
Figura 4.2 Esquema funcional de una neurona artificial (Beltrán, 2012).....	31
Figura 4.3 Esquema de la red neuronal (Matich, 2001).....	34
Figura 4.4 Error en función del número de iteraciones.	35
Figura 4.5 Arquitectura de la red neuronal seleccionada para el estudio (Adaptado de González 2018).	36
Figura 4.6 Comparación entre los espesores objetivo obtenidos del diseño estructural y la salida obtenida por (a) RNA para la solución de base granular y (b) RNA para la subrasante estabilizada.	37
Figura 6.1 Diagrama de caja y bigotes para la energía requerida en los diferentes escenarios en clima normal (Elaboración propia).....	46
Figura 6.2 Soluciones estructurales que requieren una menor energía para su construcción. (Elaboración propia).....	48
Figura 6.3 Gráfico energía v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 3% - clima normal.	53
Figura 6.4 Gráfico energía v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 5% - clima normal.	54
Figura 6.5 Gráfico energía v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 13% - clima normal.	55
Figura 6.6 Diagrama de caja y bigotes para la cantidad de CO ₂ emitida por las tres soluciones en diferentes escenarios en clima normal (Elaboración propia).....	57
Figura 6.7 Soluciones estructurales que emanan una menor cantidad de CO ₂ en su construcción.....	58
Figura 6.8 Gráfico CO ₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 3%. - clima normal.	62
Figura 6.9 Gráfico CO ₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 5% - clima normal.	62
Figura 6.10 Gráfico CO ₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 13% - clima normal.	63
Figura 6.11 Diagrama de caja y bigotes para la cantidad de árido requerida en los diferentes escenarios en clima normal	64
Figura 6.12 Soluciones estructurales que requieren un menor consumo de áridos para su construcción.....	65
Figura 6.16 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 3% - clima normal.	69

Figura 6.17 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 5% - clima normal.	69
Figura 6.18 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 13% - clima normal.	70
Figura 6.19 Diagrama de caja y bigotes para la energía requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios para clima lluvioso (Elaboración propia).....	71
Figura 6.20 Soluciones estructurales que requieren una menor energía para su construcción. (Elaboración propia).....	72
Figura 6.21 Gráfico energía v/s distancia de acopio de material granular, para un CBR igual a 3% – clima lluvioso.	77
Figura 6.22 Gráfico energía v/s distancia de acopio de material granular, para un CBR igual a 5% – clima lluvioso.	78
Figura 6.23 Gráfico energía v/s distancia de acopio de material granular, para un CBR igual a 13% – clima lluvioso.	79
Figura 6.24: Diagrama de caja y bigotes para la producción de CO ₂ por las tres soluciones en los diferentes escenarios – clima lluvioso.....	80
Figura 6.25 Soluciones estructurales que requieren una menor energía para su construcción.....	81
Figura 6.26 Gráfico CO ₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 3 – clima lluvioso %.	85
Figura 6.27 Gráfico CO ₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 5% – clima lluvioso.	85
Figura 6.28 Gráfico CO ₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 13% – clima lluvioso.	86
Figura 6.29 Diagrama de caja y bigotes para la cantidad de áridos requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios en climas lluviosos.	87
Figura 6.30 Soluciones estructurales que requieren una menor cantidad de áridos para su construcción.....	88
Figura 6.31 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 3% - clima lluvioso.	92
Figura 6.32 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 5% - clima lluvioso.	92
Figura 6.33 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 13% - clima lluvioso.	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Producto Interno Bruto del sector forestal (Modificado Gysling et al, 2018).....	2
Tabla 3.1 Criterios de diseño Tránsito.....	25
Tabla 3.2 CBR combinado de la subrasante	27
Tabla 3.3 Criterios de diseño CBR combinado.....	28
Tabla 3.4 Condiciones del clima (Gonzales, 2018).	29
Tabla 4.1 Funciones de transferencia (Navarro, 2017)	33
Tabla 4.2 Calidad de ajuste entre valores	35
Tabla 5.1: Subprocesos involucrados en la construcción de los caminos forestales	38
Tabla 5.2: Energía requerida en la producción de áridos	39
Tabla 5.3 Energía requerida en la colocación de la base granular	42
Tabla 5.4 Energía requerida en la estabilización de la subrasante.....	44
Tabla 6.1 Parámetros estadísticos para la energía requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios en clima normal (todos los valores en MJ/m ² de camino forestal construido).	45
Tabla 6.2 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la energía - clima normal.	50
Tabla 6.3 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la energía - clima normal.....	51
Tabla 6.4 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la energía - clima normal.	52
Tabla 6.5 Parámetros estadísticos de la producción de CO ₂ producido por las tres soluciones en los diferentes escenarios en clima normal (todos los valores en kg de CO ₂ /m ² de camino forestal construido).	56
Tabla 6.6 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de CO ₂ emanada – clima normal.	59
Tabla 6.7 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de CO ₂ emanada – clima normal. ...	60
Tabla 6.8 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de CO ₂ emanada – clima normal.	61
Tabla 6.9 Parámetros estadísticos de la cantidad de material granular a utilizar por las tres soluciones en los diferentes escenarios en clima norma (todos los valores en m ³ /m ² de camino forestal construido).	64
Tabla 6.10 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de áridos – clima normal.....	66
Tabla 6.11 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de áridos – clima normal.	67
Tabla 6.12 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de áridos– clima normal.	68
Tabla 6.13 Parámetros estadísticos para la energía requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios para clima lluvioso (todos los valores en MJ/m ² de camino forestal construido).	71
Tabla 6.14 Diferencia porcentual de la solución de energía mínima para CBR=5 con respecto a la solución tradicional – clima lluvioso.	74
Tabla 6.15 Diferencia porcentual de la solución de energía mínima para CBR=5 con respecto a la solución con subrasante estabilizada – clima lluvioso.....	75
Tabla 6.16 Diferencia porcentual de la solución de energía mínima para CBR=5 con respecto a la solución con base estabilizada – clima lluvioso.	76

Tabla 6.17 Parámetros estadísticos de la producción de CO ₂ producido por las tres soluciones en los diferentes escenarios (todos los valores en kg de CO ₂ /m ² de camino forestal construido).	80
Tabla 6.18 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5% – clima lluvioso.	82
Tabla 6.19 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% – clima lluvioso.....	83
Tabla 6.20 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% – clima lluvioso.	84
Tabla 6.21 Parámetros estadísticos de la cantidad de material granular a utilizar por las tres soluciones en los diferentes escenarios (todos los valores en m ³ /m ² de camino forestal construido).	87
Tabla 6.22 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5% - clima lluvioso.	89
Tabla 6.23 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% - clima lluvioso.....	90
Tabla 6.24 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% - clima lluvioso.	91

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 INDUSTRIA FORESTAL

La industria forestal es la encargada de realizar todas las tareas necesarias para establecer, repoblar, gestionar y proteger los bosques y aprovechar sus productos. Actualmente existen más de 4 mil millones de hectáreas de bosque a nivel mundial, que cubren el 31% de la superficie continental del planeta, del cual 264 millones son bosques plantados, que suministran aproximadamente el 35% de la madera demandada (FAO, 2010).

Se estima que el consumo de madera aumentará más de un 60% para el año 2030, con respecto al 2010, por lo cual es necesario fomentar el crecimiento de las plantaciones en el mundo y el manejo sustentable del bosque nativo, para así evitar posibles erosiones y deforestaciones (FAO, 2010).

Las cortas a tala rasa, la construcción de caminos y el proceso de transporte desde la zona de corta hasta una zona de acopio, en temporada húmeda son las acciones de cosecha forestal que generan mayor impacto sobre el medio ambiente, por lo cual existe una demanda constante por mitigar el efecto de estas operaciones.

1.1.2 CUANTIFICACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA CONSUMIDA, EMANACIÓN DE CO₂ Y UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LOS CAMINOS FORESTALES

Debido al impacto ambiental que conlleva la construcción de un camino forestal, es importante medir la cantidad de energía requerida en el proceso constructivo, la cantidad de gases invernaderos emanados y la cantidad de material granular a utilizar.

La energía se cuantifica según la energía incorporada (*Embodied Energy*), la cual corresponde a energía no renovable consumida en la adquisición de materias primas, considerando su procesamiento, fabricación y transporte al lugar donde se ejecuta la obra (Carmona, 2010).

La contaminación se cuantifica calculando la huella de carbono producida, la cual consiste en un recuento de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂), que incluye los seis gases de efecto invernadero recogidos en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

El consumo de áridos se cuantificará de acuerdo a la cantidad utilizada, en m³, por metro cuadrado de camino forestal construido.

1.1.3 INDUSTRIA FORESTAL EN CHILE

En Chile, la industria forestal corresponde al tercer rubro exportador de mayor importancia, luego de la minería y la industria de alimentos (Gysling et al, 2018), aportando con un PIB superior a los 2.696 (miles de millones de pesos encadenados) en cada uno de los últimos 4 años (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Producto Interno Bruto del sector forestal (Modificado Gysling et al, 2018)

Año/ Year	PIB a costo de factores/ GDP at factor cost	PIB del Sector Forestal/ GDP of Forestry Sector
2013	137.876	2.778
2014	140.312	2.740
2015	143.547	2.850
2016	145.364	2.755
2017	147.530	2.696

Fuente/Source: Banco Central de Chile/Central Bank of Chile.

En el 2017, el consumo de madera en trozos en la industria forestal primaria llegó a más de 45 millones de metros cúbicos sólidos sin corteza (m³ssc), siendo una demanda de 2,7% mayor que en el año 2016.

La mayor industria consumidora de madera es la de pulpa (37,7% del consumo total), luego la industria del aserrío (35,1%), seguida por la industria de astillas (16,5%) y finalmente la de tableros y chapas (9,7%), como se muestra en la figura 1.1 (Gysling et al, 2018).

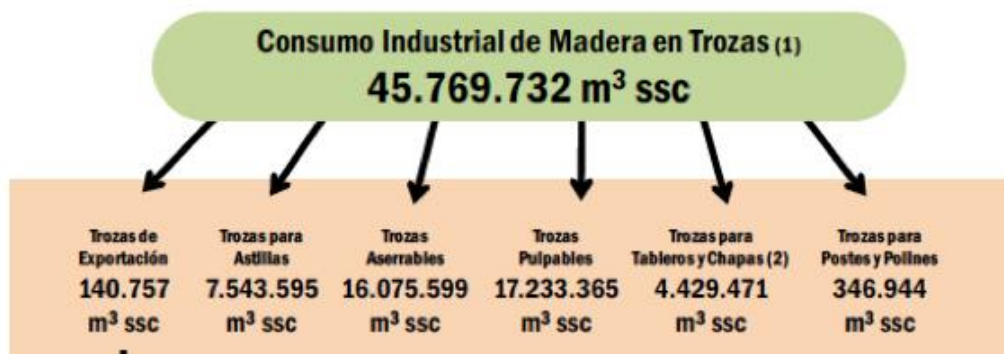


Figura 1.1 Consumo industrial de madera 2017 (Modificado Gysling et al, 2018)

Demanda que debe ser cubierta principalmente por las industrias forestales de la región del Maule, Bío Bío, Araucanía, de los Lagos y de los Ríos. La distribución de las industrias forestales en Chile se presenta en la figura 1.2.

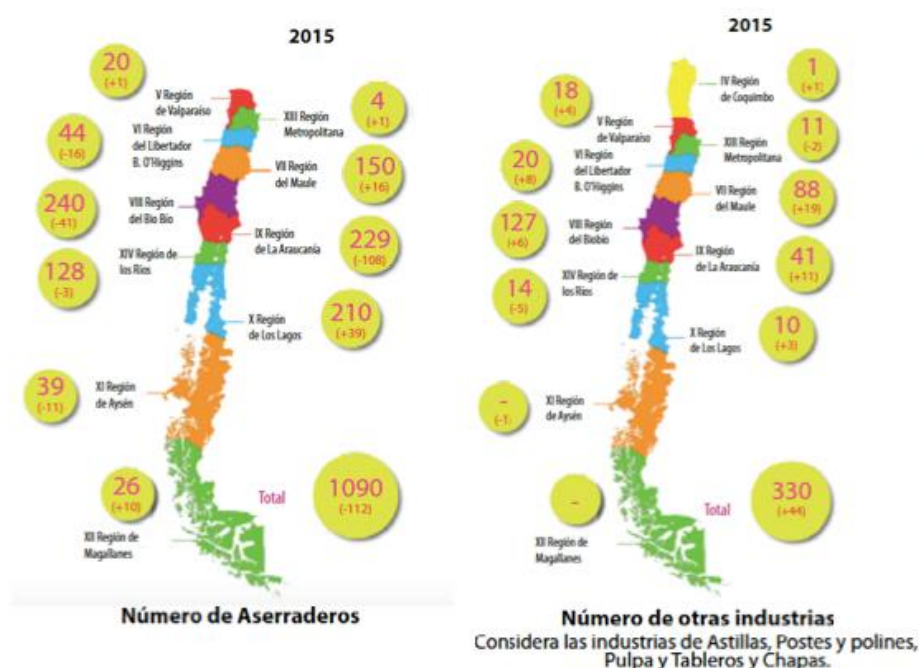


Figura 1.2 Mapa del número de industrias forestales en Chile (Gysling & Soto, 2018)

1.1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La explotación progresiva de los bosques ha provocado cambios importantes en el ecosistema, afectando la reproducción diversas especies, es por esto, que en los últimos 25 años, desde la creación de la legislación medioambiental en Chile, se ha despertado la preocupación por generar prácticas que mitiguen el impacto en el medio ambiente y por lo tanto decanten en políticas de explotación sustentable, permitiendo así cubrir la demanda de los mercados, que cada vez son más exigentes, por lo que si Chile quiere mantener su desarrollo continuo, debe encontrar una forma eficiente y limpia para impulsar este crecimiento (Ministerio de Energía, 2013).

Si bien son muchos los factores que afectan la sustentabilidad de la industria forestal, en este estudio se cuantificará la energía requerida en el proceso constructivo, la cantidad de CO₂ emanadas y la cantidad de áridos requerido en la construcción de diferentes soluciones de camino forestal, las cuales actualmente no están siendo consideradas como variables de decisión.

La energía requerida para la construcción servirá como parámetro inicial de sustentabilidad, ya que los materiales y procesos elegidos para la construcción de un proyecto son definitivos para establecer qué tan sostenible es y cómo disminuye su impacto ambiental (Carmona, 2010)

La cuantificación de la producción de CO₂ será importante para mitigar la contribución al cambio climático, ya que este es el principal gas encargado de capturar el calor en la corteza terrestre, produciendo un aumento de la temperatura promedio de la tierra, tendencia la cual se hace cada día más evidente (Useros, 2013).

Finalmente, es importante considerar el consumo de áridos en la construcción de los caminos forestales, ya que tienen un alto impacto medioambiental: primero por los efectos negativos producidos en la extracción y procesamiento, como lo son el ruido, las vibraciones, las emisiones de partículas, etc. y segundo, considerar que se trata de un recurso natural no renovable (Fontalba & Cristina, 2009)

1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.2.1 HIPÓTESIS

La solución estructural tradicional de caminos forestales (carpeta granular sobre subrasante) consume una menor cantidad de energía, de áridos y presenta una menor cantidad de emisiones de CO₂ en ciertos escenarios, frente a las otras soluciones de caminos.

1.2.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar el consumo de energía, áridos y producción de CO₂ en la construcción de tres tipos de solución para caminos forestales de explotación.

1.2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para el cumplimiento del objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar, entrenar y validar una red neuronal que sea capaz de calcular los espesores de las capas estructurales de las diferentes soluciones de los caminos forestales en tres tipos de solución.
- Modelar el proceso de construcción de los caminos forestales de explotación que permita calcular la energía, emisión de CO₂ y utilización de material granular, considerando la producción de los materiales, el transporte y la colocación de los mismos, las variables y parámetros más relevantes en el diseño y construcción de caminos para tres tipos de solución.
- Analizar comparativamente los resultados obtenidos para la energía requerida y la huella de carbono producida por los diferentes tipos de estructuras de caminos forestales en tres tipos de solución.

1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

La presente memoria está enfocada en cuantificar el consumo de energía y producción de CO₂ en la construcción de caminos forestales de explotación en la industria forestal chilena.

El estudio considera el modelamiento de tres procesos constructivos: (i) solución tradicional, que consiste en una capa gruesa de material granular de buena calidad, colocado sobre el suelo existente, (ii) una solución con una capa de material granular no tratado, de buena calidad, colocado sobre una subrasante que ha sido previamente estabilizada con cemento y (iii) una solución con una capa estabilizada de material granular, tratado con cemento, colocado sobre el suelo existente.

El modelo constructivo está basando en el espesor de las capas del diseño estructural del camino forestal, el cual es obtenido a través del entrenamiento de una red neuronal artificial, mediante el método de *retro-propagación*, con una base de datos obtenida del software mePADS, que considera el método empírico-mecanista sudafricano.

El modelo considera:

- que el suelo se encuentra caracterizado por la capacidad de soporte de la subrasante, modelado como un sistema bicapa, con valores entre 1% y 20%.
- que la pendiente longitudinal del camino forestal es inferior al 5%.
- que el camino se encuentra en una región con clima normal o lluvioso, los cuales condicionan la existencia de un suelo no saturado y saturado, respectivamente.
- los factores de conversión de energía entregados por la Guía práctica para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, 2011), para el cálculo de la energía producida por el diésel y la energía eléctrica.
- los factores de conversión de energía entregados por el reporte de desarrollo sostenible de Polpaico (2010), para el cálculo de la energía producida por el cemento utilizado.
- los factores de conversión de CO₂ entregados por la Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- las solicitudes de tránsito calculadas a partir del volumen de madera a transportar, con un rango entre 0 y 50.000 m³ de madera transportada por camión.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

Capítulo 1: Introducción, objetivos, alcance y estructura de la memoria.

Capítulo 2: Estudio bibliográfico sobre la industria forestal, la construcción de caminos, la maquinaria requerida, estabilización de suelos, energía embebida en los materiales utilizados, huella de carbono producida en el proceso constructivo.

Capítulo 3: Métodos general de análisis energético y de emanación de CO₂ de las diferentes soluciones estructurales de caminos forestales bajo diferentes escenarios, identificando las variables y parámetros de entrada en el estudio.

Capítulo 4: Redes Neuronales Artificiales.

Capítulo 5: Análisis de resultados

Capítulo 6: Conclusiones, comentarios y recomendaciones.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 INDUSTRIA FORESTAL

2.1.1 OBJETIVOS DE LA INDUSTRIA FORESTAL

La industria forestal es la encargada de realizar todas las tareas necesarias para establecer, repoblar, gestionar y proteger los bosques y aprovechar sus productos; como así también transportar los productos forestales en bruto, para su posterior procesamiento en la industria primaria, ya sea en astillado, aserrío, pulpa, producción de tableros, chapas, postes y polines. De forma que se cumpla con la calidad exigida, al menor costo y respetando las condiciones ambientales (Dykstra & Heinrich, 1996).

2.1.2 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE MADERA

El proceso de extracción de la madera comprende la corta de árboles, la preparación de los troncos y su extracción y transporte a larga distancia hasta los centros de elaboración (Poschen, 2012).

Todos los métodos de extracción y producción consideran las siguientes etapas:

- Apeo: Cortado de un árbol por el pie y derribo.
 - Poda: Eliminación de la zona inútil y ramas del tronco.
 - Carga: Traslado de los troncos al medio de transporte y fijación de la carga.
 - Transporte: Los troncos son llevados hasta los centros de producción.
- Corresponde al eslabón entre el aprovechamiento forestal la fábrica, por lo que es una operación de gran importancia, ya que puede alcanzar hasta el 60% del coste total del abastecimiento de madera, dependiendo de factores como las dimensiones de la operación, la situación geográfica del bosque y la fábrica y la distancia entre ellas (Poschen, 2012).

2.1.3 CAMINOS FORESTALES Y SU IMPORTANCIA

La ingeniería de los caminos forestales comprende la determinación del diseño, trazado, construcción y mantenimiento de los mismos.

Los caminos forestales corresponden a las vías encargadas de proporcionar un acceso fácil y seguro al predio forestal, lo que facilita la extracción, ordenación, vigilancia y transporte de la madera producida.

Un diseño, construcción y/o mantenimiento inadecuado de los caminos forestales puede incurrir en elevados costes de producción, mantenimiento y transporte; ya que podría acortar su vida útil, producir elevadas cantidades de sedimentación a los cursos de agua colindantes, erosionar el suelo, aumentar el riesgo de deslizamiento de tierras en pendientes pronunciadas, entre otros.

2.1.4 CONSTRUCCIÓN DE LOS CAMINOS FORESTALES

La construcción de carreteras es especialmente desafiante en la industria forestal, ya que por la geografía donde se encuentran los bosques, los suelos, si bien son apropiados para el crecimiento de los árboles, son de mala de mala calidad para la construcción de carreteras. Además, por las extensiones de los predios forestales, el acceso a agregados de buena calidad es difícil y costoso.

Los caminos forestales se clasifican como caminos de bajo volumen de tráfico pero sometido a altas cargas, como se puede ver según la clasificación presentada en la Figura 2.1 (Douglas, 2016).

Peso del vehículo	Liviano	Caminos de transporte pesado en minería, arena de alquitrán, combustible, petróleo, gas y caminos forestales.	Autopistas
	Pesado	Caminos tradicionales de bajo volumen	Calles de ciudades
		Bajo	Alto
		Volumen de tráfico	

Figura 2.1 Clasificación de caminos (Douglas, 2016)

Los métodos de construcción, para garantizar la factibilidad y funcionalidad de los caminos forestales, exigen la tala de los árboles y el movimiento de tierra para conseguir estructuras capaces de soportar el paso de camiones cargados, aún en condiciones ambientales adversas.

Los caminos forestales normalmente están constituidos por una sola capa de agregados triturados sobre el suelo o subrasante ya existente, como se muestra en la Figura 2.2.

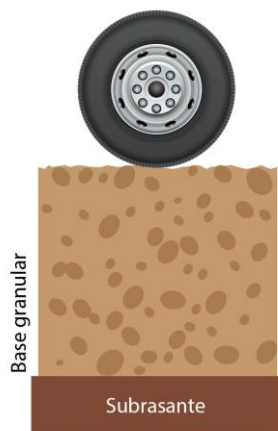


Figura 2.2 Estructura de la solución tradicional (Adaptado González, 2018)

Otras soluciones, menos comunes, son la mejora de la subrasante existente o de la capa de agregados triturados, mediante el uso de estabilizadores cementosos, como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Estructura de las soluciones alternativas (Adaptado González, 2018)

2.2 CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS

El proceso de construcción considerado en la evaluación comienza con la preparación de la subrasante. Si no se trata, normalmente los primeros 150 mm de la subrasante se reforman utilizando la motoniveladora, y luego se compactan con rodillos de acero, hasta el 95% de su densidad seca máxima determinada previamente en el laboratorio mediante pruebas de compactación estandarizadas.

Si es necesario, el contenido de humedad de la subrasante se ajusta rociando agua con camiones cisterna para lograr su contenido de humedad óptimo para la compactación. Para la subrasante estabilizada, el proceso de construcción es diferente, porque los primeros 150 mm de la subrasante se mezclan luego con un material cementoso, por ejemplo, cemento hidráulico.

La subrasante existente se rasga y se mezcla con la cuchilla niveladora del motor, para lograr un material más homogéneo. Si es necesario, los camiones cisterna rocían agua y aumentan la humedad del material tratado, para lograr así un contenido de humedad óptimo.

Luego, los camiones esparcen cemento sobre la superficie de la carretera tratando de mantener una tasa de cemento constante y uniforme, expresada normalmente en términos de masa de cemento sobre el área de la superficie. Esta tasa, normalmente equivale a 3-4% de cemento por metro cúbico de subrasante compactado y debe determinarse previamente en un estudio de laboratorio. Luego, la motoniveladora mezcla el cemento con la capa inferior de 150 mm, mezclando el material tratado con la cuchilla. Cuando la motoniveladora logra un material tratado homogéneo, el rodillo de acero compacta la superficie hasta que se alcanza la densidad objetivo. Para verificar la efectividad de la estabilización del cemento antes de la construcción de la capa granular no tratada, los contratistas normalmente realizan pruebas en carretera, como el deflectómetro liviano (LWD).

Para la construcción de la base granular desatada sobre la subrasante, los agregados se obtienen primero de una cantera. Durante el proceso de extracción, las excavadoras, los camiones y los cargadores transportan la materia prima a la máquina trituradora. La máquina trituradora fabrica el agregado con una distribución de tamaño de partícula específica que cumple con los estándares de construcción requeridos por la empresa

forestal. Los agregados se almacenan en el área próxima al foso de préstamo o se transportan al sitio de construcción.

La distancia entre la cantera y el sitio de construcción tiene una gran influencia en la energía consumida para construir un pavimento (Thenoux et al., 2007); por lo tanto, se espera que la distancia de acarreo en las carreteras forestales también sea importante. Para la estabilización de la base, los camiones distribuyen uniformemente el material granular sobre la subrasante, y luego preforman la motoniveladora. Luego, los camiones extienden el cemento en la superficie usando la tasa de aplicación para lograr el contenido de cemento de diseño. Luego los camiones rocían agua durante el proceso para lograr un contenido de humedad óptimo y los rodillos de acero compactan la capa estabilizada para lograr el 98% de la densidad seca óptima, previamente determinada en el laboratorio.

Las máquinas de estabilización también pueden tratar la subrasante o capas granulares no tratadas, logrando buenos resultados (González et al., 2009). Estas máquinas aplican un alto nivel de energía de mezcla a los materiales tratados, logrando una buena homogeneidad y calidad. Sin embargo, su uso en caminos forestales es menos frecuente que los proyectos de carreteras comunes porque su buena productividad no se explota en escenarios donde la mayoría de las carreteras son cortas y están ubicadas en áreas aisladas. En otras palabras, las máquinas de estabilización son más frecuentes en proyectos donde se tratan grandes secciones de caminos, y el transporte de la máquina de estabilización no se transforma en un problema.

2.3 MÉTODO DE DISEÑO ESTRUCTURAL

2.3.1 MÉTODO SUDAFRICANO

El método empírico-mecanicista sudafricano, a través de un análisis estático, en el cual se aplican cargas que no varían su magnitud durante el transcurso del tiempo, para determinar las tensiones y deformaciones, en posiciones críticas, ocurridas en el pavimento producto de las solicitaciones de tránsito aplicadas (Fernández & Ivanna, 2013).

Luego, con los valores de tensiones y deformaciones, se evalúan las funciones de transferencia, para así obtener el criterio de fatiga, que relaciona el número de cargas que pueden ser aplicadas en la estructura antes de alcanzar la condición final de deterioro.

Es importante mencionar que la guía chilena de “Caminos de Bajo Volumen de Tránsito (CBVT)” se basa en este método (Thenoux et al, 2002).

Esto se realiza de manera iterativa, como se presenta en la Figura 2.4.

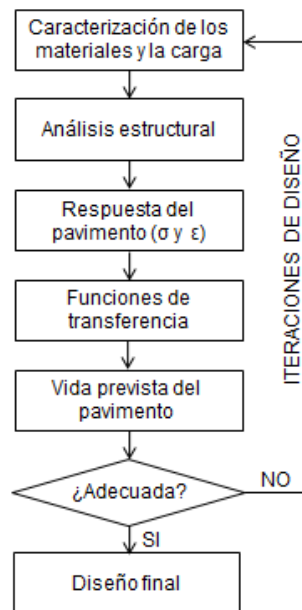


Figura 2.4 Procedimiento Iterativo del método sudamericano (Theyse, 1996)

El método empírico mecanicista sudafricano presenta los siguientes modelos de deterioro:

2.3.2 MODELO DE DETERIORO PARA EL MATERIAL GRANULAR

El criterio de falla para materiales granulares se debe a la densificación y deformación de la estructura granular producto de las tensiones de corte a las cuales se encuentra sometido cuando es cargado repetitivamente.

El factor de seguridad está correlacionado con la deformación gradual permanente en los materiales granulares, y se calcula según:

$$F = \frac{s_3 \left[K \tan^2 \phi + \frac{j}{2} \right] + 2 \times C \tan \phi + \frac{j}{2}}{(s_1 - s_3)}$$

Cuya ecuación simplificada es de la forma

$$F = \frac{s_3^j + c_{\text{term}}}{(s_1 - s_3)}$$

Donde:

s_1, s_3 : corresponden a los esfuerzos principales, mayor y menor respectivamente, actuando en un punto de la capa granular (esfuerzo de compresión es positivo y tracción negativo).

C : cohesión

j : ángulo de fricción interna

K : constante : 0,65 : para condiciones saturadas
0,8 : para condiciones moderadas de humedad
0,95 : para condiciones normales de humedad

La función de transferencia, utilizada para predecir la fatiga del material, está dada por:

$$N_A = 10^{2,605122F + 4,510819}$$

Donde:

N_A : número de cargas aplicadas para la falla.

2.3.3 MODELO DE DETERIORO PARA EL MATERIAL DE LA SUBRASANTE

El criterio de falla para el material de la subrasante se determina por la deformación vertical permanente en esta capa, cuyo parámetro crítico es la deformación vertical (e_v).

Su función de transferencia, considerando un camino diseñado con un 50% de confiabilidad, y para una condición terminal de ahuellamiento de 20 mm, está dada por la expresión:

$$N_f = 10^{36,70 - 10 \log e_v}$$

Donde

N_f : número de cargas aplicadas para la falla.

e_v : deformación unitaria de compresión en superficie de la subrasante.

2.4 ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS

La estabilización de los suelos busca mejorar las propiedades naturales de este, como su resistencia, estabilidad volumétrica, compresibilidad, durabilidad y permeabilidad, mejorando así su desempeño frente a acciones mecánicas y climáticas de manera perdurable (Serigos, 2009).

Los procesos de estabilización considerados en este trabajo de investigación son del tipo mecánico y físico-químicos.

La estabilización mecánica consiste en la compactación del suelo existente, con el fin de obtener un suelo más denso, ya que la energía mecánica incorporada, reduce los vacíos de aire, aumentando así su densidad, y por consiguiente su resistencia, mejorando la estabilidad volumétrica y una disminución en la permeabilidad del suelo (Sagües, 2008).

La estabilización físico-química produce cambios en las propiedades del suelo mediante la adición de cemento, el cual al entrar en contacto con el suelo, se hidrata y produce compuestos que a la vez reaccionan con los minerales arcillosos del suelo existente, generando un material cementante que origina la unión de las partículas de suelo con el cemento endurecido, dando como resultado un material con una mayor rigidez y resistencia mecánica, lo que implica una mayor estabilidad volumétrica y durabilidad que el suelo preexistente (Serigos, 2009).

2.5 CONSUMO DE ENERGÍA EN LOS MATERIALES UTILIZADOS - FACTORES DE CONVERSIÓN

2.5.1 CONSUMO DE ENERGÍA EN EL PROCESO CONSTRUCTIVO DE CAMINOS FORESTALES DE EXPLOTACIÓN

Los principales recursos energéticos utilizados por los diferentes procesos constructivos, y por cada alternativa de rehabilitación: reciclado o mezclas asfálticas autorreparables con fibras de lana de acero son: diésel, gas natural y electricidad.

Para la comparación, estos recursos energéticos se convirtieron en unidades de energía equivalentes, utilizando un factor de conversión (FC) (Balance Nacional de Energía, 2015):

1 litro de diesel a MJ: $FC = 38,34$

1 kW-hora a MJ: $FC = 3,60$

1 kg de cemento a MJ: $FC = 3,60$

2.1.1. Producción de CO₂ en el proceso constructivo de caminos forestales de explotación

Para la cuantificación de la cantidad de CO₂ se considerarán los factores de conversión de la Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (2011), para el diésel y el KW-hora, y del reporte de desarrollo sostenible de Polpaico (2010) para el cemento.

1 litro de diésel a kg de CO₂: $FC = 2,79$

1 kW-hora a kg de CO₂: $FC = 0,181$

1 kg de cemento a kg de CO₂: $FC = 0,508$

2.6 REDES NEURONALES APLICADAS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Las redes neuronales artificiales (RNA) son una herramienta computacional de inteligencia artificial, capaces de adquirir conocimiento en base a la experiencia, y modelar relaciones complejas entre variables o patrones de entrada y salida (Beltrán, 2012).

Estas presentan bastantes ventajas, de las cuales destacan su aprendizaje adaptativo, auto organización, tolerancia a fallos, operación a tiempo real y fácil inserción dentro de la tecnología existente, por lo cual ha sido adaptada para solucionar problemas relacionados con diferentes ámbitos de la ingeniería.

A partir de la década de los 90, las RNAs comenzaron a tener utilidad en la resolución de problemas de análisis, diseño y evaluación de pavimentos (Meier and Rix, 1994), siendo una alternativa a métodos más tradicionales, y computacionalmente más costosos, como el uso de elementos finitos.

Este método ha sido utilizado para el diseño y análisis de pavimentos flexibles, como por ejemplo para determinar las propiedades elásticas de un recapado de asfalto sobre hormigón (Khazanovich et al, 1997), para predecir el agrietamiento de arriba hacia abajo en pavimentos flexibles (Owusu-Ababio et al, 1998), etc.

En pavimentos rígidos ha sido implementada para el análisis de las respuesta de hormigón con juntas bajo la acción de cargas del tren de aterrizaje de un avión (Ceylan et al, 1998 y 1999), para determinar las respuestas mecánicas críticas en pavimentos rígidos (Quirós et al, 2015), para predecir el escalonamiento (Navarro, 2017), etc.

Además, la guía empírico mecanicista, MEPDG, utilizó a las redes neuronales para la determinación de tensiones y deformaciones, como caracterización de las respuesta del pavimento, frente a diferentes condiciones de carga (Navarro, 2017).

3 MÉTODO GENERAL DE ANÁLISIS

3.1 INTRODUCCIÓN

El siguiente capítulo presenta un modelo conceptual del proceso de construcción de los caminos forestales de explotación, que permita calcular la energía, emisión de CO₂ y la cantidad de material granular, desde la producción de los materiales, hasta el transporte y colocación de los mismos.

El modelo considera dos etapas: el diseño estructural del camino forestal y la construcción del mismo.

La primera etapa se divide en dos: en primer lugar se diseñar, entrenar y valida una red neuronal que sea capaz de calcular los espesores de las capas estructurales de las diferentes soluciones de los caminos forestales en tres tipos de solución a través del software mePADS, y luego, en segundo lugar, se calculan los espesores de las capas que componen el camino, de acuerdo a los diferentes escenarios: clima normal y lluvioso, CBR (de 1 a 20%, cada 1%), la distancia entre el lugar de acopio de material granular y el lugar de construcción del camino (0 a 100 km, cada 5 km) y el volumen de madera a transportar (de 5.000 a 50.000 m³, cada 5.000 m³).

La segunda etapa evalúa el proceso constructivo, en el cual se considera la producción y transporte de áridos, el transporte de agua para compactación, la colocación de la base granular, y en caso de ser necesario, la producción y transporte de cemento y la estabilización de la subrasante.

Con los resultados obtenidos por este modelo será posible analizarlos comparativamente para la energía requerida, la huella de carbono producida y la cantidad de árido requerida por los diferentes tipos de estructuras de caminos forestales en tres tipos de solución.

La Figura 3.1 representa el modelo del proceso.

DETERMINACIÓN DEL ESPESOR

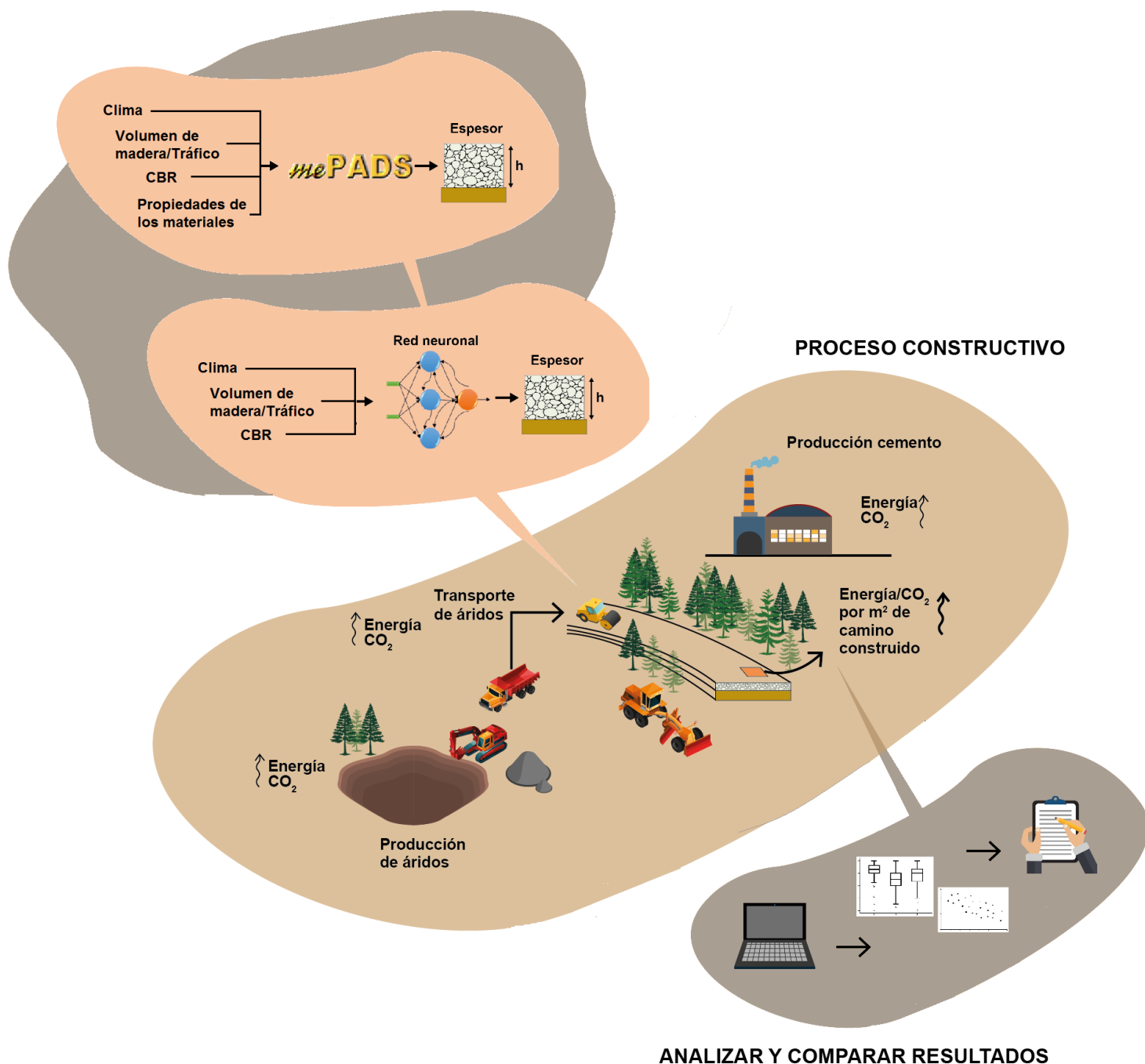


Figura 3.1 Modelo de diseño y construcción de un camino forestal (Adaptado González, 2018)

3.2 ESTRUCTURAS DE CAMINO A EVALUAR

Las estructuras de camino consideradas son:

- i) convencional, que consiste en una capa gruesa de material granular de buena calidad, colocado sobre el suelo existente, conocido como subrasante en la ingeniería vial (Figura 3.2a);
- ii) una capa de material granular no tratado, de buena calidad, colocado sobre una subrasante que ha sido previamente mejorada o químicamente estabilizada con cemento o cal (Figura 3.2b); y
- iii) una capa estabilizada de material granular, tratado con cemento, colocado sobre el suelo existente (Figura 3.2c).

El objetivo de la estabilización de la subrasante (Figura 3.2b) y del material granular (Figura 3.1c) es aumentar la resistencia y reducir la sensibilidad a la humedad de la subrasante y los materiales granulares, respectivamente.

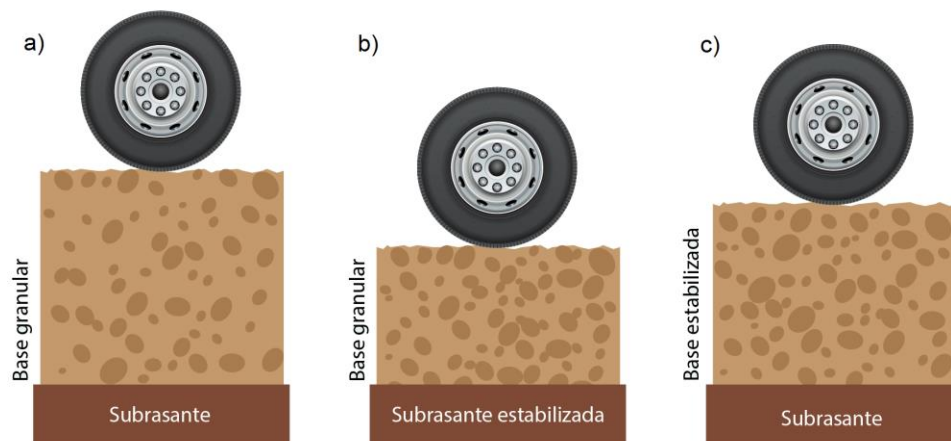


Figura 3.2 Estructura de los caminos forestales (Adaptado González, 2018)

3.3 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Para analizar el problema del diseño estructural es necesario definir los parámetros a considerar como datos de entrada para entrenar y verificar la red neuronal. En este caso se considerarán como parámetros de entrada, o *input*, el tránsito o volumen de madera a transportar junto con la capacidad de soporte del suelo; y como datos de salida, o *target*, el espesor de la base, que es previamente calculado con el software mePADS, como se representa en la Figura 3.3.

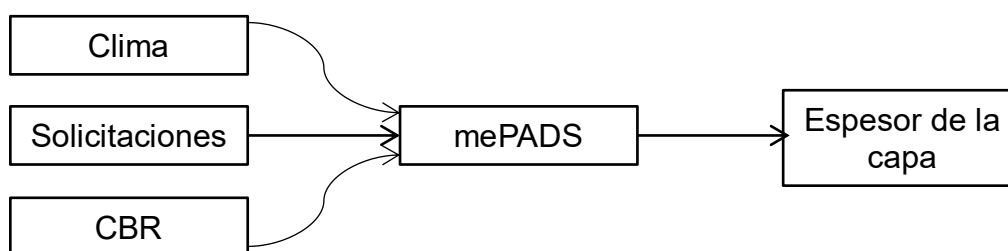


Figura 3.3 Proceso de obtención del espesor de la base (Elaboración propia)

3.3.1 TRÁNSITO O VOLUMEN DE MADERA

Para cuantificar el efecto destructivo debido al paso de un vehículo sobre un camino, se considera el concepto de Eje Equivalente (EE), dependiendo de las cargas y el tipo de ejes de los diferentes vehículos, el cual corresponde a un eje simple rueda doble (ESRD) de 80 kN (11 Ton, de acuerdo Decreto N° 572 de 12 de Junio de 1975 del Ministerio de Obras Públicas), con una presión de contacto de 600 kPa y una separación entre ruedas de 35 cm, como se representa en la Figura 3.4.

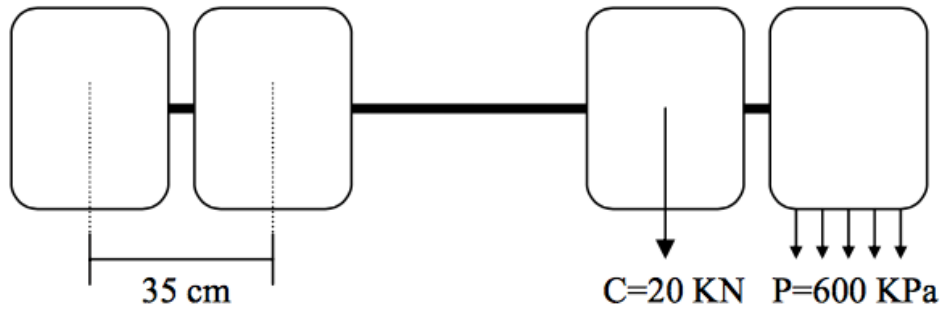


Figura 3.4 Representación de Eje Equivalente (Thenoux et al, 2002)

En este estudio se considerarán los Ejes Equivalentes de un camión de 1 eje simple de rueda simple (ESRS) y 1 eje doble de rueda doble (EDRD) con un remolque de 2 eje simple rueda doble (ESRD), los cuales serán calculados en función de los 15,5 toneladas de tara del camión y el volumen de madera cosechada, con valores comúnmente observados en la industria forestal.

Para determinar los ejes equivalentes es necesario sumar los factores equivalentes de carga (FEE) para cada eje (Vázquez, 2016), los cuales se calculan como:

$$FEE = \left(\frac{L_x}{L_s} \right)^4$$

Donde L_x : carga de un eje simple, tándem o tridem (ton).
 L_s : carga de un eje estándar (ton),

En el viaje de ida se considerará que el camión traslada al remolque sobre él, como se muestra en la Figura 3.5.

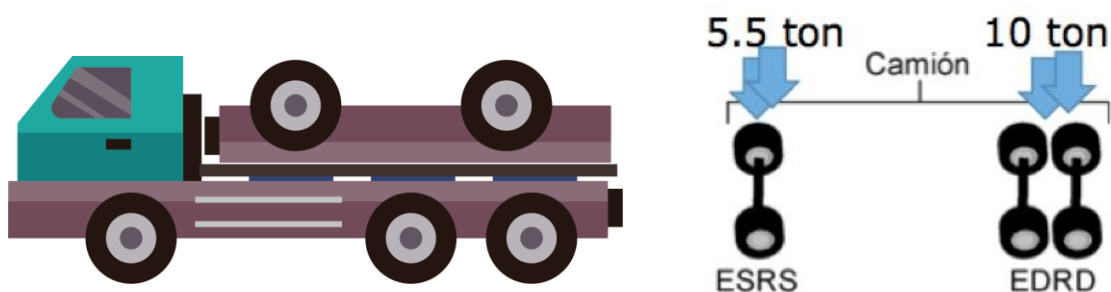


Figura 3.5 Camión ida (Adaptado González, 2018)

Los cálculos para el viaje con el camión descargado consideran los valores de carga de un eje estándar por de acuerdo Decreto N° 572 de 12 de Junio de 1975 del Ministerio de Obras Públicas, y se adjuntan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Ejes equivalentes camión descargado.

	Camión		Remolque	
Viaje Descargado	Eje Delantero	Eje Trasero	Eje Delantero	Eje Trasero
Tipo Eje	ESRS	EDRD	ESRD	ESRD
Eje Estándar (ton)	7	18	11	11
Peso (ton)	5,5	10	0	0
FEE	0,4	0,1	0	0

Lo que corresponde a 0,5 eje equivalente.

En el viaje de vuelta se considerará el camión cargado a su límite legal de 45 toneladas, más un 10% de sobrecarga, para obtener valores de diseño más conservadores, lo que permite una carga máxima de madera cosechada de 34 toneladas, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Camión vuelta (Adaptado González, 2018)

Los cálculos para el viaje con el camión con el camión cargado, considerando un 10% de sobrecarga y los valores de carga de un eje estándar por de acuerdo Decreto N° 572 de 12 de Junio de 1975 del Ministerio de Obras Públicas, se adjuntan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Ejes equivalentes camión cargado.

	Camión		Remolque	
Viaje Descargado	Eje Delantero	Eje Trasero	Eje Delantero	Eje Trasero
Tipo Eje	ESRS	EDRD	ESRD	ESRD
Eje Estándar (ton)	7	18	11	11
Peso (ton)	7,7	19,8	11	11
FEE	1,5	1,5	1	1

Lo que corresponde a 5 ejes equivalentes.

Es decir, el viaje de ida y vuelta corresponde a 15 ejes equivalentes.

Considerando que el camión tiene una capacidad máxima de 34 m³, se puede establecer

la equivalencia de $\frac{15 \text{ Ejes}}{34 \text{ m}^3} = 0,44 \text{ ejes equivalentes por cada metro cúbico de madera}$

transportada.

Como criterio de diseño, y basado en la experiencia de la industria forestal, se adoptarán los siguientes rangos de cosecha de madera, tomando siempre el valor más conservador para el modelamiento, como se muestra en la tabla 3.4

Tabla 3.1 Criterios de diseño Tránsito

Rango de Cosecha (m³)	Adoptado en el diseño (m³)	EE
< 2.500	2.500	1100
2.500 – 5.000	5.000	2200
5.000 – 15.000	12.000	5280
15.000 – 30.000	25.000	11000
30.000 – 50.000	40.000	17600
50.000 – 100.000	75.000	33000
100.000 – 300.000	200.000	88000
300.000 – 600.000	450.000	198000
> 600.000	600.000	264000

3.3.2 CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE

La capacidad de soporte de la subrasante es una de las variables más importantes a considerar en el diseño, ya que es la encargada de dar la resistencia y soporte a las cargas que es sometida.

Su comportamiento mecánico depende de sus características: contenido de humedad, grado de compactación, estructura interna, etc, y se encuentra bien caracterizado por el módulo resiliente (M_R) (Navarro, 2017).

El módulo resiliente se puede definir de manera indirecta a partir de los resultados de los ensayos que determinan el CBR, a través de las siguientes expresiones, obtenidas del Manual de Carreteras de Chile, volumen N°3, Instrucciones y criterios de diseño, (MOP, 2018):

$$M_R \text{ (MPa)} = 17,6(\text{CBR})^{0,64} \quad \text{Si el CBR} < 12\%. \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

$$M_R \text{ (MPa)} = 22,1(\text{CBR})^{0,55} \quad \text{Si } 12 \leq \text{CBR} < 80\% \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

En esta investigación la subrasante se modeló como un sistema bicapa, con la finalidad de obtener un CBR combinado que sea representativo, ya que los primeros 20 centímetros de profundidad corresponden a suelo compactado a una densidad al 95% de

la densidad máxima compactada seca (DMCS) y luego, la segunda capa, corresponde al de la subrasante que se encuentra a densidad natural, como se representa en la Figura 3.7.

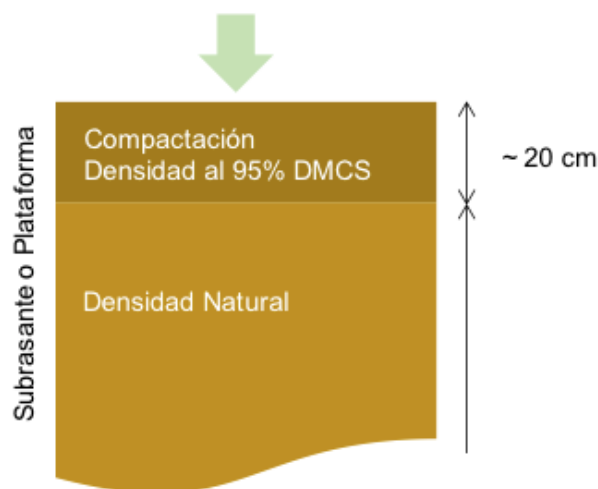


Figura 3.7 Modelo bicapa de la subrasante (González, 2018).

Para obtener el CBR combinado se utilizan las fórmulas de combinación del Manual de Carreteras de Chile, volumen N°3, Instrucciones y criterios de diseño, versión 2018:

$$M_{Rd} = F \times M_{R0} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

$$\frac{1}{F} = \frac{0,125}{0,0156 + h^2} \left[\frac{M_{R1}^{2/3}}{M_{R0}^{2/3}} + \frac{M_{R0}}{M_{R1}} \right] \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde:

M_{Rd} : módulo resiliente de diseño (MPa).

F : factor dado por la Ecuación 3.4.

M_{R0} : módulo resiliente de la subrasante o capa de orden 0 (MPa)

M_{R1} : módulo resiliente de la subrasante o capa de orden 1 (MPa)

h : espesor de la capa de orden 1 (m)

La Tabla 3.5 representa el CBR combinado, de acuerdo a los CBR más representativos para la condición de la subrasante con CBR con un 95% DMCS, y con CBR a densidad natural, con los cuales se calculan los módulos resilientes correspondiente, de acuerdo a las ecuaciones 3.1 o 3.2, para luego calcular el valor del factor F, de acuerdo a la ecuación 3.4, y finalmente el valor del módulo resiliente combinado, de acuerdo a la ecuación 3.3, obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.2 CBR combinado de la subrasante

		CBR a la densidad maxima compactada seca (%)																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	50			
CBR a la densidad natural (%)	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	6			
	2		2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	7	7	8	9			
	3			3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	9	9	10	11			
	4				4	4	5	5	6	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	8	9	10	11	12	13			
	5					5	5	6	6	7	7	7	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10	11	12	12	13	15		
	6						6	6	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10	10	10	11	12	13	14	15	16		
	7							7	7	8	8	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	11	13	14	15	16	18		
	8								8	8	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12	14	15	16	17	19		
	9									9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	13	15	16	17	18	20		
	10										10	10	11	11	12	12	12	13	13	14	14	15	17	18	19	21			
	11											11	11	12	12	13	13	13	14	14	15	16	18	19	20	22			
	12												12	12	13	13	14	14	15	15	15	17	18	20	21	23			
	13													13	13	14	14	15	15	16	16	18	19	21	22	24			
	14														14	14	15	15	16	16	17	18	20	22	23	25			
	15															15	15	16	16	17	17	19	21	22	24	26			
	16																16	16	17	17	18	20	22	23	25	27			
	17																	17	17	18	18	20	22	24	25	28			
18																		18	18	19	21	23	25	26	29				
19																			19	19	22	24	25	27	30				
20																				20	22	24	26	28	31				
25																						25	27	29	31	35			
30																							30	32	34	38			
35																								35	37	41			
40																									40	44			
50																										50			

Como criterio de diseño, y basado en la experiencia de la industria forestal, se definen los siguientes rangos de CBR de manera arbitraria, para lo cual se adoptarán de manera conservadora, el mínimo de cada rango de valores de CBR combinado, como se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.3 Criterios de diseño CBR combinado.

CBR %	CBR de diseño%
< 2	1
2 – 3	2
4 – 6	4
7 – 10	7
11 – 15	11
16 – 20	16
> 20	20

3.3.3 EFECTOS DEL CLIMA

El diseño estructural de un camino requiere de antecedentes relacionados con el clima, ya que este es una variable que modifica las propiedades mecánicas del suelo, condicionando el comportamiento de este.

En sectores donde el camino se encuentre expuesto a inundaciones, tenga un mal sistema de drenaje y no cuente con un bombeo adecuado, se encontrará más propenso a fallar prematuramente, ya que la saturación provocará una disminución en la resistencia de la capa granular y eventualmente, de la subrasante.

Existen tres condiciones de humedad para el diseño estructural: seca, normal y saturada, de acuerdo al método sudafricano.

En este caso como los caminos forestales son construidos principalmente en el sur de Chile se considerarán condiciones de humedad normal y saturada, dependiendo si la precipitación esperada supera o no una “precipitación crítica”, la cual produce una “saturación crítica”. En el caso que la precipitación supere la precipitación crítica presentada en la Tabla 3.7, se diseñará considerando condiciones de saturación (Thenoux et al, 2002).

Tabla 3.4 Condiciones del clima (Gonzales, 2018).

Tipo de Suelo	Pendiente Longitudinal	Precipitación crítica en Región: del Maule, Biobío y Araucanía (mm)	Precipitación crítica en Región: de Los Lagos y de Los Ríos (mm)
Arcillas y Limos	> 5%	1800	1500
A4, A5, A6, A7	< 5%	1200	1000
Arenas y Gravas	> 5%	3000	2500
A1, A2, A3, A4	< 5%	1800	1500

4 REDES NEURONALES ARTIFICIALES – RNAS

4.1 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales tienen su unidad básica de procesamiento inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano: la neurona. Esta consiste, básicamente, un procesador de información simple que está compuesto por un canal de entrada (dendritas), un procesador (soma) y un canal de salida (axón), como se ilustra en la figura 4.1:

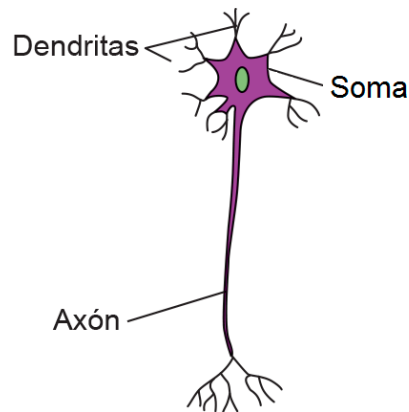


Figura 4.1 Neurona biológica (Elaboración propia)

Las RNAS están conformadas por un conjunto de unidades de procesamiento, o neuronas, interconectadas, las cuales reciben, procesan y transmiten señales o información hacia otras las cuales tienen conexión, lo cual forma un sistema con robusta capacidad de procesamiento de datos (Navarro, 2017).

Por todo lo anteriormente mencionado, y para reducir el tiempo a un nivel práctico, en esta memoria se emplea esta metodología para determinar los espesores, de manera precisa y prácticamente inmediata, de las capas que componen las diferentes soluciones presentadas para un camino forestal. Esta RNA se basa en los resultados obtenidos por el método de diseños de pavimentos empírico mecanicista, a través del software mePADS.

4.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UNA NEURONA ARTIFICIAL

Los componentes principales y funcionamiento de una neurona artificial N_i se presentan en la figura 4.2.

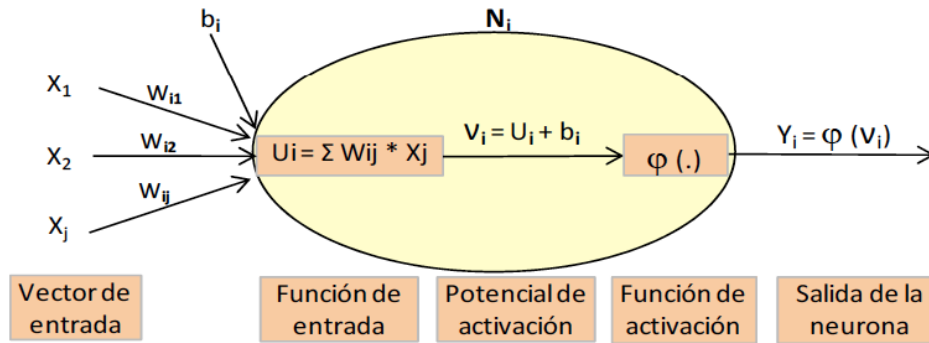


Figura 4.2 Esquema funcional de una neurona artificial (Beltrán, 2012)

Donde

$\{X_1, X_2, \dots, X_j\}$: corresponde al vector de entrada de información.

$\{W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{ij}\}$: corresponde al vector de pesos sinápticos. Cada una de las neuronas tiene asociado un valor llamado peso sináptico, del cual dependerá la intensidad de la señal transmitida (Beltran, 2012). Si el peso es positivo, negativo o neutro la señal será excitadora, inhibitoria o nulas, respectivamente (Navarro, 2017).

b_i : sesgo o bias, el cual corresponde a un término de ajuste incorporado para aumentar un grado de libertad al modelo neuronal, y determina el nivel de umbral o de activación de la neurona.

U_i : Corresponde a la función de entrada, la cual se encuentra definida a partir del vector de entrada y de pesos sinápticos.

$$U_i = U_i(X_1, X_2, \dots, X_j, W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{ij}) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

La funciones más utilizadas son la sumatoria de las entradas pesadas (Ecuación 4.2), la productoria de las entradas pesadas (Ecuación 5.3) y el máximo de las entradas pesadas (Ecuación 4.4). (Matich, 2001)

$$U_i = \sum_{j=1}^n (w_{ij} \times x_j) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Esta ecuación corresponde a la suma de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicados por sus pesos correspondientes.

$$U_i = \prod_{j=1}^n (w_{ij} \times x_j) \quad \text{Ecuación 4.3}$$

La cual corresponde al producto de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicados por sus pesos correspondientes.

$$U_i = \max_j (w_{ij} \times x_j) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

La cual solo toma en consideración el valor de entrada más fuerte multiplicado por su peso correspondiente.

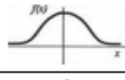
n_i : Potencial de activación, se calcula como la suma de la función de entrada y el sesgo, como se muestra en la ecuación 4.5.

$$n_i = U_i + b_i \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$f(.)$: Función de transferencia. En esta función se evalúa el potencial de activación, con la finalidad de limitar la magnitud de la señal de salida de la neurona. Generalmente entrega valores entre 0 a 1, o entre -1 a 1 (Matich, 2001).

Las funciones de transferencia más utilizadas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Funciones de transferencia (Navarro, 2017)

	Función	Rango	Gráfica
Función Identidad	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$	
Función Sigmoidal	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$[0, +1]$	
Función Gaussiana	$y = Ae^{-Bx^2}$	$[0,1]$	
Función Sinusoidal	$y = A \text{ sen}(\omega_x + \varphi)$	$[-1, +1]$	

Y_i : Función de salida. El valor de esta función es el valor de resultante luego del proceso de la neurona i , por ende esta función es la que determina el valor que será transferido a la neurona siguiente. Los valores de salida pueden estar contenidos en el intervalo $[0, 1]$, $[-1,1]$, o ser binarios: $\{0, 1\}$ $\{-1, 1\}$ (Matich, 2001).

4.3 ARQUITECTURA DE UNA RED NEURONAL

La arquitectura de la red neuronal define la topología de las conexiones entre neuronas, que determinará cómo será la comunicación entre los nodos que conforman la red, por lo que es necesario definir el número de capas ocultas, el número de neuronas y conexiones que identifique de mejor manera el problema a resolver.

Las redes neuronales más utilizadas son las multicapas (Beltran, 2012) las cuales consiste en un arreglo de neuronas en diferentes niveles en paralelo, en las cuales el primer nivel corresponde a la capa de entrada, los niveles intermedios a la capa oculta o intermedia, y el último nivel a la capa de salida, como se ilustra en la Figura 4.3.

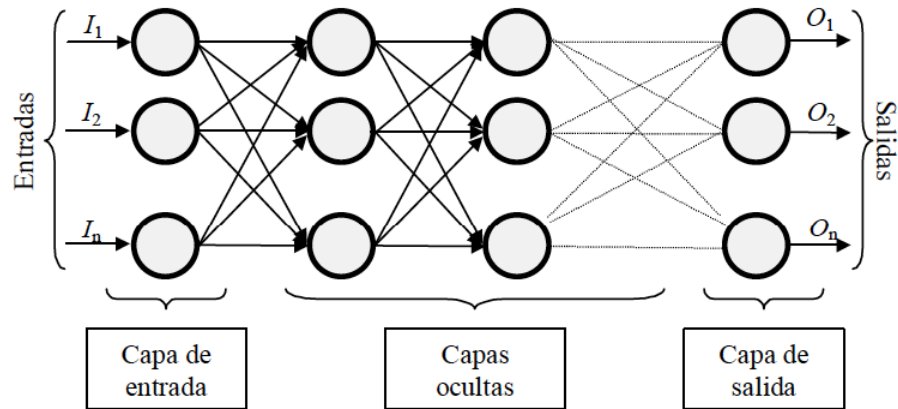


Figura 4.3 Esquema de la red neuronal (Matich, 2001).

En este tipo de arquitectura, el aprendizaje se propaga desde la entrada hasta la salida, y no se permite la interacción de neuronas ubicadas en el mismo nivel, siendo las señales de salida de un nivel, las de entrada del siguiente.

Como resultado final, las señales de salida de la capa final representan el resultado global de la red neuronal.

4.4 ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

El entrenamiento de la red neuronal corresponde al proceso donde la red va ajustando los pesos sinápticos entre las conexiones de las neuronas, condicionando los niveles de precisión y velocidad de resolución del problema (Beltran, 2012).

El aprendizaje en esta investigación será del tipo *supervisado*, ya que para ciertos valores de entrada, ya se conocen los valores de salida.

El algoritmo de aprendizaje a utilizar será el de *retro-propagación*, en el cual como las conexiones entre las neuronas no forman un ciclo, se produce una transmisión unidireccional de la información, en la cual los valores de salida esperados se comparan con los obtenidos, y en función del error obtenido, se actualizan los pesos sinápticos, con el fin de disminuir el error. La magnitud del incremento de los pesos se fija previo al entrenamiento y permanece constante durante el proceso iterativo del aprendizaje.

4.5 CRITERIOS DE DETENCIÓN

En las primeras iteraciones de aprendizaje, la red neuronal se va adaptando a los valores de entrada – salida, acomodándose cada vez más al problema en estudio, y favoreciendo la generalización, por lo que se espera que en cada nueva iteración, la diferencia entre las salidas deseadas y calculadas por el modelo, conocido como el error, vaya siendo cada vez menor. Sin embargo, es fundamental determinar en qué momento se debe detener el entrenamiento de la red neuronal, para evitar que la red se comience a ajustar a datos irrelevantes, o ruidos, etapa conocida como sobreentrenamiento o sobreaprendizaje de la red, lo cual a medida que aumenta el número de iteraciones, el error obtenido va siendo cada vez mayor. La figura 4.4 representa algunas de las tendencias que puede presentar el error a medida que se entrena la red neuronal (Beltrán, 2012).

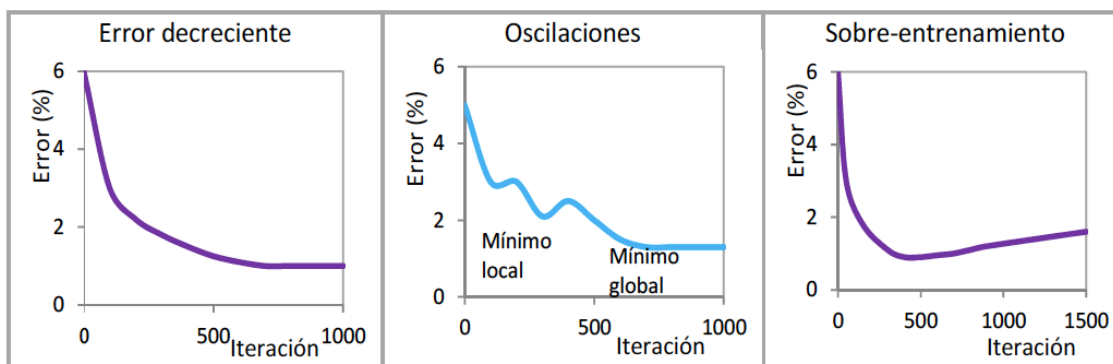


Figura 4.4 Error en función del número de iteraciones.

La calidad de los ajustes de las redes neuronales artificiales entre los valores medidos y estimados puede ser evaluada a través del coeficiente de determinación, r^2 , y la razón entre el error estándar de los valores pronosticados y la desviación estándar de los valores medidos (Beltrán, 2012), siguiendo los criterios presentados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Calidad de ajuste entre valores

Ajuste	r^2	Se/Sy
Excelente	≥ 0.9	≤ 0.35
Bueno	0.70 – 0.89	0.36 – 0.55
Regular	0.40 – 0.69	0.56 – 0.75
Malo	0.20 – 0.39	0.76 – 0.90
Muy malo	≤ 0.19	≥ 0.90

Fuente: Pellinen (2001) en Ceylan, Gopalakrishnan y Kim (2009)

4.6 SOFTWARE A UTILIZAR

Para el modelamiento y entrenamiento de la red neuronal artificial se utilizó el *Neural Network Toolbox* del software Matlab 2015, considerando como datos de entrada el tránsito o volumen de madera, la capacidad de soporte de la subrasante, los efectos del clima, y como datos de salida el espesor de la subrasante, previamente calculados por el software mePADS.

El diseño del espesor del camino forestal se llevó a cabo en combinaciones específicas del CBR de la subrasante y el volumen de la madera a transportar.

La resistencia de la subrasante más representativa fue 1, 2, 4, 7, 13, 18 y 20%; y el volumen de madera a transportar fue de 2,500; 5,000; 12,000; 25,000; 40,000; 75,000; 200,000, 450,000; y 600.000 m³. Por lo tanto, el diseño de espesor estaba disponible para toda la combinación de CBR y volumen de madera transportada.

Luego de varias pruebas de ensayo y error, se determinó que la solución óptima para el problema, se obtiene a partir de combinación de la función de entrenamiento lineal (TRAINLM) con una función de desempeño del error cuadrático medio (MSE), dispuestos en una red neuronal de 4 capas, con una neurona en cada capa, cuyas funciones de transferencia de la primera a la tercera capa, es del tipo sigmoideal (TANSIG), y en la última capa, es de la forma lineal (PURELIN), como se esquematiza en la figura 4.5.

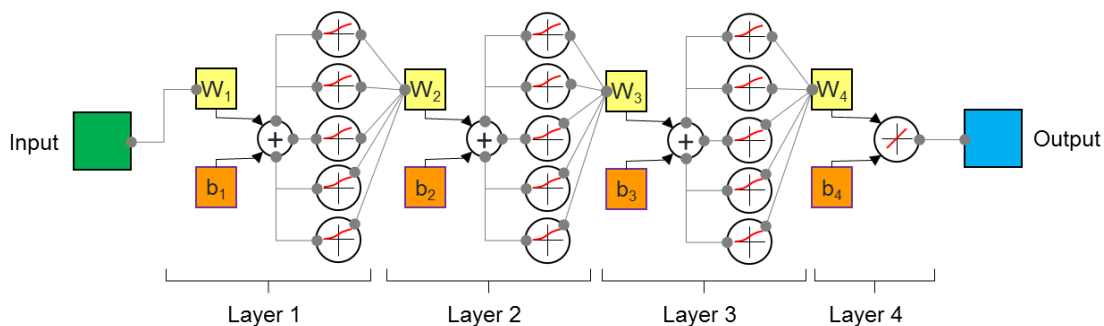


Figura 4.5 Arquitectura de la red neuronal seleccionada para el estudio (Adaptado de González 2018).

Los resultados del entrenamiento presentan un valor de r^2 igual a 0,99879 para la solución tradicional, correspondiente que consiste en una capa gruesa de material granular de buena calidad, colocado sobre el suelo existente; y de 0,99904 para la solución con la subrasante estabilizada, como se muestra en la Figura 4.6.

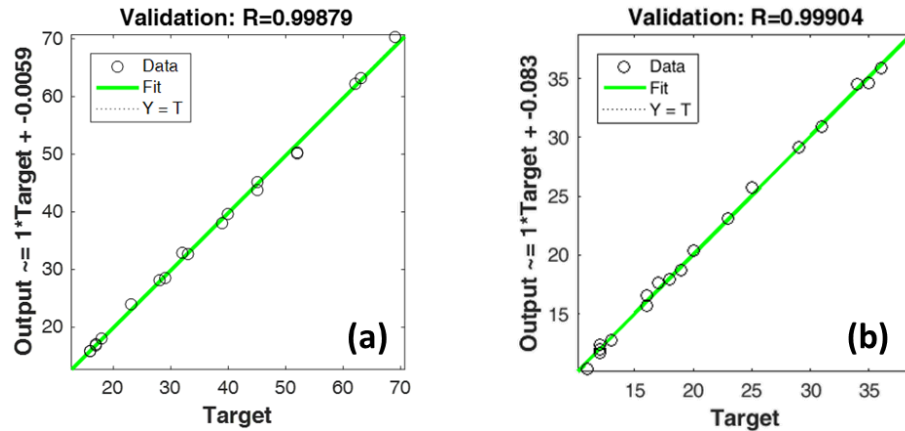


Figura 4.6 Comparación entre los espesores objetivo obtenidos del diseño estructural y la salida obtenida por (a) RNA para la solución de base granular y (b) RNA para la subrasante estabilizada.

Es decir, de acuerdo a la Tabla 5.2, el ajuste es excelente, lo cual se explica ya que el espesor calculado por la red neuronal difiere en menos de un 1% de la solución prevista por el software mePADS por la combinación de las variables de entrada.

4.7 IMPLEMENTACIÓN EN EXCEL

Los datos de salida de cada capa, el peso (W) y los sesgos (b), se implementan en una hoja de cálculo de Excel, para así poder obtener los espesores de las capas estructurales del camino forestal, considerando todas las posibles combinaciones para el clima (normal o lluvioso), los diferentes valores de CBR (de 1 a 20%, cada 1%), y el volumen de madera a transportar (de 5.000 a 50.000 m³, cada 5.000 m³).

5 MODELO DE EVALUACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

5.1 MODELAMIENTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

El primer paso en el modelado fue definir las condiciones generales de la construcción de la carretera para las tres alternativas propuestas. El diseño del proyecto de construcción se definió por las características de un tramo de camino forestal de longitud (L) de 1000 m y ancho de la sección (W) 4 metros. La cantidad de material granular utilizado en la construcción del camino, fue determinada por W, L, y el espesor, h, de la capa granular, previamente calculado en el diseño del espesor mediante la red neuronal.

Para el cálculo de la energía requerida para la construcción del camino forestal, la emanación de gases invernaderos, se considerarán los subprocesos presentados en la tabla 5.1 para cada tipo de solución.

Tabla 5.1: Subprocesos involucrados en la construcción de los caminos forestales

	Base granular	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Producción de áridos	•	•	•
Transporte de áridos	•	•	•
Transporte de agua para compactación	•	•	•
Colocación base granular	•	•	•
Producción de cemento		•	•
Transporte de cemento		•	•
Estabilización de la base			•
Estabilización de la subrasante		•	

Los cuales se detallan a continuación en esta sección.

5.1.1 PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS

La tabla 5.2 presenta el cálculo de energía asociado a la producción de áridos, en MJ/m³ de base construida.

Tabla 5.2: Energía requerida en la producción de áridos (González, 2018)

Equipo	Rendimiento		Capacidad		Energía	
Planta	130,0	kWh-h	25	m ³ /h	0,56	MJ/m ³ base
Excavadora	15,0	lt/h	25	m ³ /h	2,18	MJ/m ³ base
Cargadores	25,0	lt/h	25	m ³ /h	3,63	MJ/m ³ base
Camiones	10,0	lt/h	25	m ³ /h	1,45	MJ/m ³ base
Total					7,82	MJ/m³ base

5.1.2 TRANSPORTE DE ÁRIDOS

Para calcular la energía necesaria para transportar el árido, primero se calcula el volumen de áridos a transportar ($V_{\text{áridos}}$), en m³, de acuerdo a la expresión:

$$V_{\text{áridos}} = L \cdot A \cdot h_{bg} \cdot F$$

Donde

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

h_{bg} : espesor de la base granular (m)

F : Factor de amplificación por esponjamiento. $F = 1 + \frac{e}{100}$. Donde e corresponde al porcentaje de esponjamiento.

En esta investigación se considera un tramo a construir de dimensiones 1000 x 4 metros, con un porcentaje de esponjamiento del 30%.

Luego se calcula el número de viajes (N) de acuerdo a la capacidad del camión ($C_{\text{camión}}$), en m³, según la expresión:

$$N = \left\lceil \frac{V_{\text{áridos}}}{C_{\text{camión}}} \right\rceil$$

Al tener el número de viajes calculado, se puede determinar la distancia total a recorrer por el camión ($D_{\text{camión}}$), en m, en sus viajes de ida y vuelta:

$$D_{camión} = 2 \cdot N \cdot d_{p-a} + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{L}{N} \cdot i = 2 \cdot N \cdot d_{p-a} + 2 \cdot (N+1) \cdot L$$

Donde d_{p-a} : distancia de la planta de áridos al lugar de construcción del camino forestal (m).

Finalmente se calcula la energía (E), en MJ / m³ base, de acuerdo a la expresión:

$$E = \frac{D_{camión}}{\eta \cdot L \cdot A \cdot h_{bg}} \cdot FC$$

Donde

$D_{camión}$: Distancia total a recorrer por el camión (m)

η : Rendimiento del camión (m/L)

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

h_{bg} : Espesor de la base granular (m)

FC : Factor de conversión

En esta investigación se considera un material granular con esponjamiento del 30% y camiones Tolva con capacidad de carga de 8 m³, de rendimiento 3.000 m/L.

5.1.3 TRANSPORTE DE AGUA PARA COMPACTACIÓN

Para calcular la energía necesaria para transportar el agua requerida para la compactación de la subrasante, primero se calcula el volumen de agua a transportar (V_{agua}), en litros, de acuerdo a la expresión:

$$V_{agua} = L \cdot A \cdot h_{bg} \cdot a_c$$

Donde

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

h_{bg} : espesor de la base granular (m)

a_c : agua para compactación (l/m³)

$$\text{Donde } a_c = (H_c - H_o) \cdot \rho_{real} \cdot 10$$

H_c : Humedad de compactación de la subrasante (%)

H_o : Humedad inicial de la subrasante (%)

ρ_{real} : Densidad real de la subrasante (ton/m³)

En esta investigación se considera una humedad de compactación de la subrasante de 18% y una humedad inicial del 12%, además de una densidad real de la subrasante de 1800 ton/m³.

Luego se calcula el número de viajes (N) de acuerdo a la capacidad del camión ($C_{camión}$), en m³, según la expresión:

$$N = \left[\frac{V_{agua}}{C_{camión}} \right]$$

Al tener el número de viajes calculado, se puede determinar la distancia total a recorrer por el camión ($D_{camión}$), en m, en sus viajes de ida y vuelta:

$$D_{camión} = 2 \cdot N \cdot d_{s-a} + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{L}{N} \cdot i = 2 \cdot N \cdot d_{s-a} + 2 \cdot (N + 1) \cdot L$$

Donde d_{s-a} : distancia del suministro de agua al lugar de construcción del camino forestal (m).

Finalmente se calcula la energía (E), en MJ / m³ base, de acuerdo a la expresión:

$$E = \frac{D_{camión}}{\eta \cdot L \cdot A \cdot h_{bg}} \cdot FC$$

Donde

$D_{camión}$: Distancia total a recorrer por el camión (m)

η : Rendimiento del camión (m/L)

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

h_{bg} : Espesor de la base granular (m)

FC : Factor de conversión.

5.1.4 COLOCACIÓN BASE GRANULAR

La tabla 5.3 presenta el cálculo de energía asociado a la colocación de la base granular, en MJ/m³ de base construida.

Tabla 5.3 Energía requerida en la colocación de la base granular (González, 2018)

Equipo	Rendimiento		Capacidad		Energía	
Rodillo Liso	18	l/h	65	m ³ /h	0,77	MJ / m ³ base
Perfiladora	20	l/h	120	m ³ /h	0,47	MJ / m ³ base
Total					1,24	MJ / m ³ base

5.1.5 PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Para calcular la energía requerida en la producción de cemento, primero es necesario calcular la cantidad de cemento requerido (C_c), en kg, de acuerdo a la expresión:

$$C_c = \rho \cdot L \cdot A \cdot e_{sr} \cdot \%C$$

Donde:

ρ : densidad del material de la subrasante (kg/m³)

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

e_{sr} : Espesor de la subrasante estabilizada (m)

$\%C$: porcentaje de cemento de la subrasante.

En esta investigación se considera un espesor de la subrasante estabilizada de 0,15 m y un 3% de cemento para la subrasante.

Luego, con la cantidad de cemento requerido, se calcula la energía requerida por unidad de m³ de base, de acuerdo a la expresión:

$$E = \frac{C_c}{L \cdot A \cdot h_{bg}} \cdot FC$$

Donde:

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

h_{bg} : Espesor de la base granular (m)

FC : Factor de conversión.

5.1.6 TRANSPORTE DE CEMENTO

La energía necesaria para transportar el cemento, se calcula de acuerdo al número de viajes (N) de acuerdo a la capacidad del camión ($C_{camión}$), en kilos, según la expresión:

$$N = \left\lceil \frac{C_c}{C_{camión}} \right\rceil$$

Al tener el número de viajes calculado, se puede determinar la distancia total a recorrer por el camión ($D_{camión}$), en m, en sus viajes de ida y vuelta:

$$D_{camión} = 2 \cdot N \cdot d_{b-c} + 2 \cdot \sum_{i=1}^N \frac{L}{N} \cdot i = 2 \cdot N \cdot d_{b-c} + 2 \cdot (N+1) \cdot L$$

Donde d_{b-c} : distancia de la bodega de cemento al lugar de construcción del camino forestal (m).

Finalmente se calcula la energía (E), en MJ / m³ base, de acuerdo a la expresión:

$$E = \frac{D_{camión}}{\eta \cdot L \cdot A \cdot h_{bg}} \cdot FC$$

Donde

$D_{camión}$: Distancia total a recorrer por el camión (m)

η : Rendimiento del camión (m/L)

L : Longitud del tramo a construir (m)

A : Ancho del tramo a construir (m)

h_{bg} : Espesor de la base granular (m)

FC : Factor de conversión.

5.1.7 ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE

La tabla 5.4 presenta el cálculo de energía asociado a la estabilización de la subrasante, en MJ/m³ de base construida.

Tabla 5.4 Energía requerida en la estabilización de la subrasante (González, 2018)

Equipo	Rendimiento		Capacidad		Energía	
Rodillo Liso	18	l/h	65	m ³ /h	0,77	MJ / m ³ base
Perfiladora	20	l/h	120	m ³ /h	0,47	MJ / m ³ base
Total					1,24	MJ / m³ base

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Si bien la energía se calcula de acuerdo al volumen de material utilizado para las tres soluciones de caminos forestales, los resultados se estandarizan considerando la energía requerida por metro cuadrado de camino forestal construido.

Se analizarán los resultados obtenidos para clima normal y lluvioso:

6.1 ENERGÍA REQUERIDA POR CADA TIPO DE SOLUCIÓN ESTRUCTURAL PARA DIFERENTES CONDICIONES EN CLIMA NORMAL.

Para poder visualizar de mejor manera los resultados obtenidos del consumo de energía requerida considerando todas las posibles combinaciones para diferentes valores de CBR (de 1 a 20%, cada 1%), distancia de transporte de material granular entre el lugar de acopio y el de construcción (de 0 a 100 km, cada 5 km) y de volumen de madera a transportar (de 5.000 a 50.000 m³, cada 5.000 m³), se lleva a cabo un análisis descriptivo con un diagrama de caja y bigote considerando todos los valores obtenidos, el cual es de utilidad para representar de manera gráfica la variabilidad de los datos de la muestra, para lo cual se obtiene el valor mínimo, máximo, el primer, segundo (mediana), y tercer cuartil, y la media aritmética, como se presenta en la tabla 6.1, cuyo gráfico se presenta en la figura 6.1.

Tabla 6.1 Parámetros estadísticos para la energía requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios en clima normal (todos los valores en MJ/m² de camino forestal construido).

	Solución tradicional	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Cuartil 1	45,27	67,53	57,69
Mínimo	16,81	45,06	28,31
Mediana	67,35	84,45	73,99
Máximo	291,07	196,24	260,76
Cuartil 3	91,93	101,89	99,16
Media	75,22	86,69	84,10

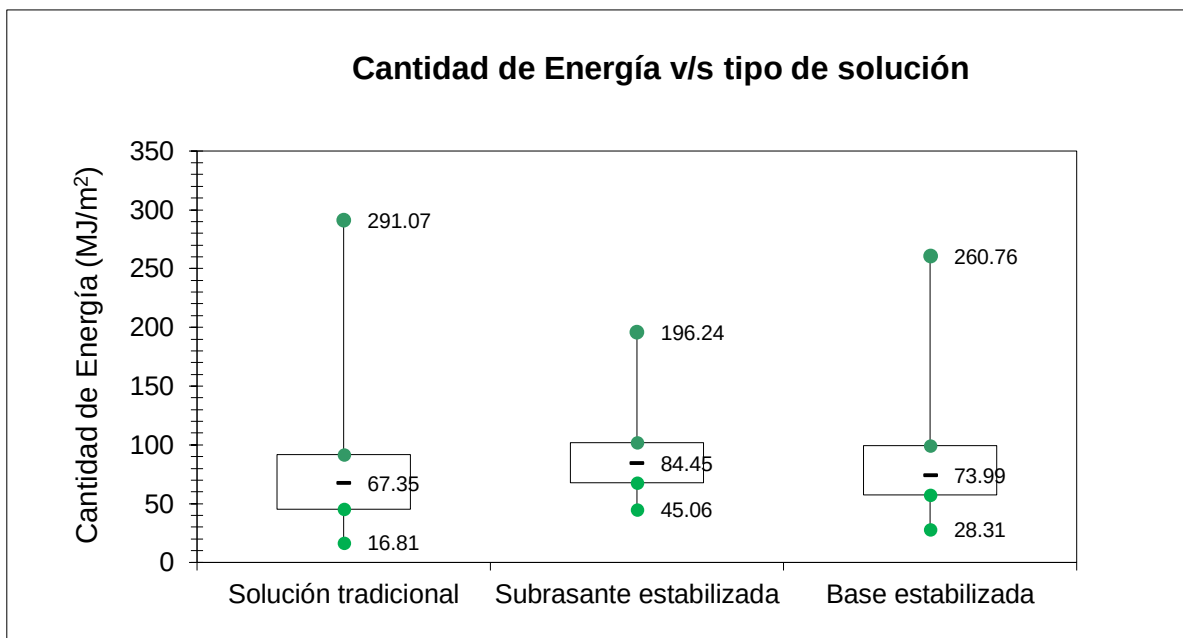


Figura 6.1 Diagrama de caja y bigotes para la energía requerida en los diferentes escenarios en clima normal (Elaboración propia)

Si bien las medias de las diferentes soluciones no difieren en más de un 15% unas con otras, es posible notar que no es un valor representativo, ya que en la figura 5.1 se puede apreciar las diferencias en las amplitudes de las diferentes soluciones, siendo la solución tradicional la que presenta una mayor variación en la energía requerida por metro cuadrado de camino forestal construido, con una amplitud de 274,26 MJ/m², mientras que las soluciones con subrasante estabilizada y base estabilizada, presentan una variación de 151,19 y 232,44 MJ/m² respectivamente, por lo que es posible concluir que la solución con menor variabilidad es la que presenta la subrasante estabilizada.

También es posible notar que los valores máximos y mínimos de energía requerida por metro cuadrado de camino forestal corresponden a la solución tradicional, por lo cual será necesario evaluar las condiciones caso a caso, para diferentes valores de capacidad de soporte del suelo, volumen de madera transportada y la distancia entre el lugar de acopio de material y el de construcción del camino.

La figura 6.2 muestra las soluciones más eficientes, desde el punto de vista energético, para las diferentes combinaciones de CBR, distancia (km), y volumen de madera transportada (m³), permitiendo identificar, robustamente, cual es la solución que requiere

una menor energía por metro cuadrado de camino forestal construido para las diferentes combinaciones de CBR, distancia de transporte de material granular entre el lugar de acopio y el de construcción, y volumen de madera a transportar. Por ejemplo para un CBR igual a 7%, una distancia de 80 km y un volumen de madera a transportar de 50.000 m³, la solución que requiere una menor cantidad de energía es la con subrasante estabilizada.

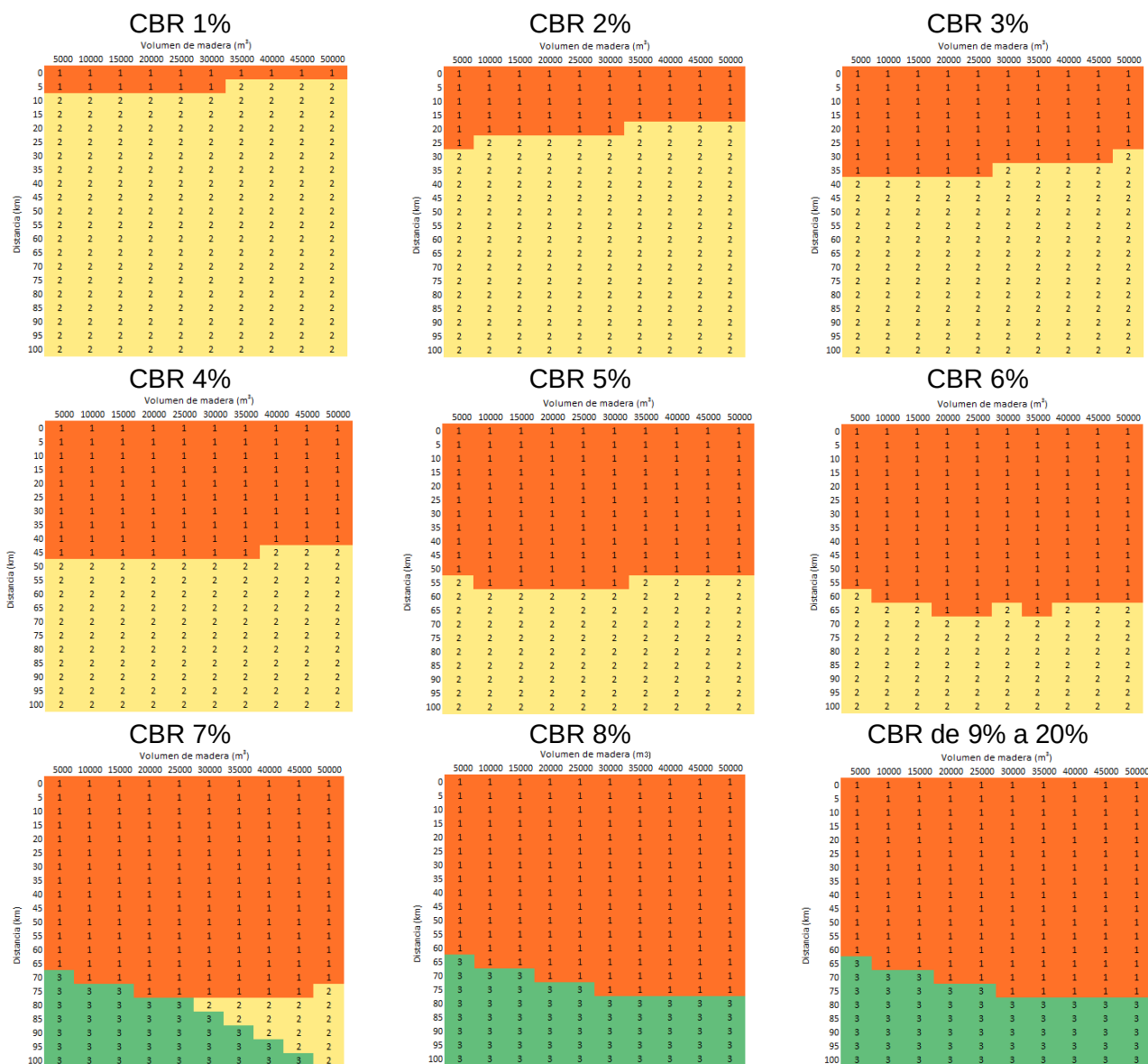


Figura 6.2 Soluciones estructurales que requieren una menor energía para su construcción. (Elaboración propia)

Donde

- 1 Representa la solución tradicional.
- 2 Representa la solución con subrasante estabilizada.
- 3 Representa la solución con la base estabilizada.

De la Figura 6.2 es posible notar que la energía requerida no es considerablemente sensible al volumen de madera a transportar, sino más bien a la distancia de transporte de material granular, donde para suelos con un CBR inferior a 6% solo se presentan como alternativas la solución tradicional y la con subrasante estabilizada. Mientras mejor es la calidad del suelo, es decir presenta un mayor valor de CBR, la solución tradicional va siendo cada vez más eficiente en términos energéticos, consolidándose como la solución óptima para suelos con CBR mayor a 6%, y una distancia de transporte de árido menor a 50 km.

Para suelos con CBR mayor o igual a 8% se puede decir que la solución con base estabilizada es siempre más eficiente para distancias de transportes mayores a 80 km. Además para suelos con una calidad de soporte entre 9% y 20%, el comportamiento es similar, considerando la solución tradicional como la de menor energía requerida para la construcción del camino forestal para distancias de transporte de áridos menores a 60 km y solución con la base estabilizada para distancias superiores a 80 km, sin importar el volumen de madera a transportar.

Para analizar de manera más detallada cada caso, se comparan los resultados presentados en la Figura 6.2 con la diferencia porcentual que tienen las demás soluciones con respecto a la solución óptima. Se indica con un guion los casos que no son necesarios de comparar, porque ya corresponden a la solución de mínima energía.

Las tablas 6.2, 6.3 y 6.4 ejemplifican los casos para el suelo con CBR igual a 5%.

Tabla 6.2 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la energía - clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55	1%	-	-	-	-	-	0%	1%	1%	2%
	60	3%	2%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	3%	4%
	65	5%	4%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	5%	5%
	70	7%	6%	5%	5%	5%	5%	6%	6%	7%	7%
	75	8%	7%	7%	6%	6%	7%	7%	8%	8%	9%
	80	10%	9%	8%	8%	8%	8%	9%	9%	10%	10%
	85	12%	10%	9%	9%	9%	10%	10%	10%	11%	11%
	90	13%	12%	11%	10%	10%	11%	11%	12%	12%	13%
	95	14%	13%	12%	12%	12%	12%	12%	13%	14%	14%
	100	16%	14%	13%	13%	13%	13%	14%	14%	15%	15%

Por ejemplo:

- Para una distancia igual a 40 km y un volumen de madera a transportar de 15.000 m³, la solución óptima corresponde a la tradicional; como se muestra en la figura 6.2, CBR 5%.
- Para una distancia a recorrer de 90 km y un volumen de madera a transportar de 25.000 m³, la solución tradicional requiere un 10% más de energía que la solución óptima, que en este caso corresponde a la que tiene subrasante estabilizada, como se muestra en la Figura 6.2, CBR 5%.

Tabla 6.3 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la energía - clima normal.

		Volumen de madera (m³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	65%	65%	64%	63%	62%	61%	60%	59%	57%	56%
	5	51%	51%	50%	50%	49%	48%	47%	46%	45%	44%
	10	40%	40%	40%	39%	39%	38%	37%	36%	35%	34%
	15	32%	32%	32%	31%	31%	30%	29%	28%	27%	27%
	20	25%	25%	25%	25%	24%	24%	23%	22%	21%	21%
	25	19%	20%	20%	20%	19%	18%	18%	17%	16%	16%
	30	15%	15%	15%	15%	15%	14%	14%	13%	12%	12%
	35	11%	11%	11%	11%	11%	11%	10%	9%	9%	8%
	40	7%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	6%	6%	5%
	45	4%	5%	5%	5%	5%	5%	4%	4%	3%	3%
	50	2%	2%	3%	3%	3%	2%	2%	1%	1%	0%
	55	-	0%	1%	1%	1%	0%	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.4 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la energía - clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	104%	106%	107%	108%	109%	109%	109%	108%	108%	107%
	5	84%	86%	87%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	87%
	10	69%	71%	72%	73%	73%	73%	73%	73%	72%	72%
	15	58%	59%	60%	61%	61%	61%	61%	61%	60%	60%
	20	48%	50%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%	51%
	25	40%	42%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%
	30	34%	35%	36%	37%	37%	37%	37%	36%	36%	36%
	35	28%	30%	30%	31%	31%	31%	31%	31%	30%	31%
	40	24%	25%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%
	45	20%	21%	21%	22%	22%	22%	22%	22%	21%	21%
	50	16%	17%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	55	13%	14%	14%	15%	15%	15%	15%	16%	16%	17%
	60	13%	13%	13%	13%	14%	14%	14%	15%	15%	16%
	65	12%	12%	13%	13%	13%	13%	14%	14%	15%	15%
	70	12%	12%	12%	12%	12%	13%	13%	13%	14%	14%
	75	12%	11%	11%	11%	12%	12%	12%	13%	13%	14%
	80	11%	11%	11%	11%	11%	11%	12%	12%	13%	13%
	85	11%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	12%	12%	12%
	90	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	12%
	95	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%
	100	10%	9%	9%	9%	9%	9%	10%	10%	11%	11%

Analizando las tablas 6.2, 6.3 y 6.4 es posible verificar las ventajas comparativas con respecto a las demás soluciones, y así poder tomar una decisión considerando más aristas del problema, como por ejemplo la cantidad de áridos a utilizar.

Al notar que la solución estructural del camino forestal de explotación no es significativamente sensible al volumen de madera transportada, se realiza el análisis de sensibilidad a la distancia de transporte de material granular.

Se realizará el análisis para un volumen de 30.000 m³ de madera transportada, para distancias de transporte de áridos 0, 5, 15, 30 y 50 km y CBR igual a 3%, 5% y 13%, que representan suelos de baja, mediana y buena calidad en el sector forestal. Los resultados se muestran en las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5.

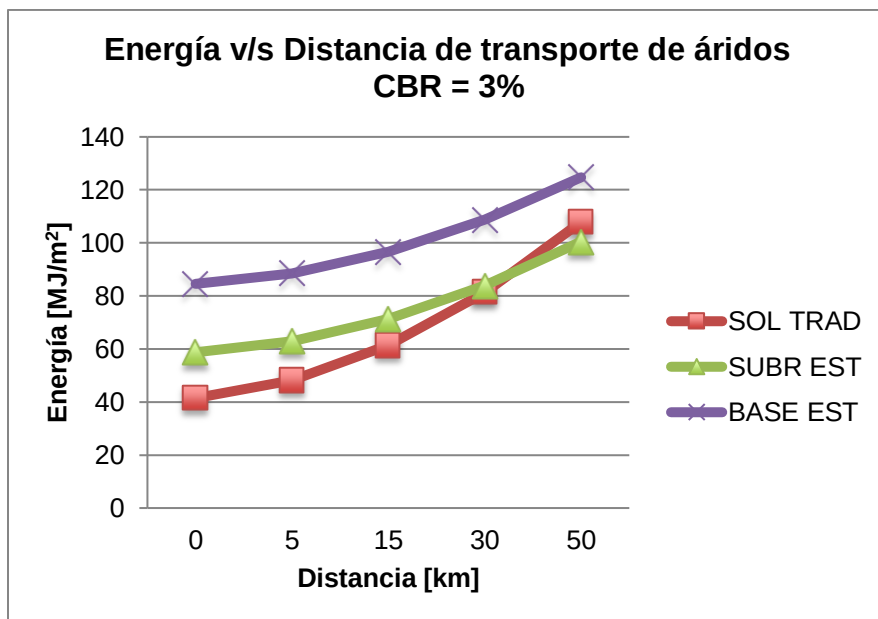


Figura 6.3 Gráfico energía v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 3% - clima normal.

Se puede ver que para suelos de baja calidad, la energía requerida para construir un metro cuadrado de camino forestal varía entre 41,46 y 124,75 MJ/m², siendo la solución con base estabilizada la menos conveniente para cualquiera de las distancias de transporte de áridos. Además, es posible notar que para distancias de transporte de material granular inferiores a 34,4 km, es más conveniente, desde el punto de vista energético, la solución tradicional, con valores entre 41,46 y 86,77 MJ/m², aproximadamente; mientras que para distancias mayores, es más conveniente la solución con subrasante estabilizada, con valores entre 86,77 y 100,48 MJ/m², aproximadamente.

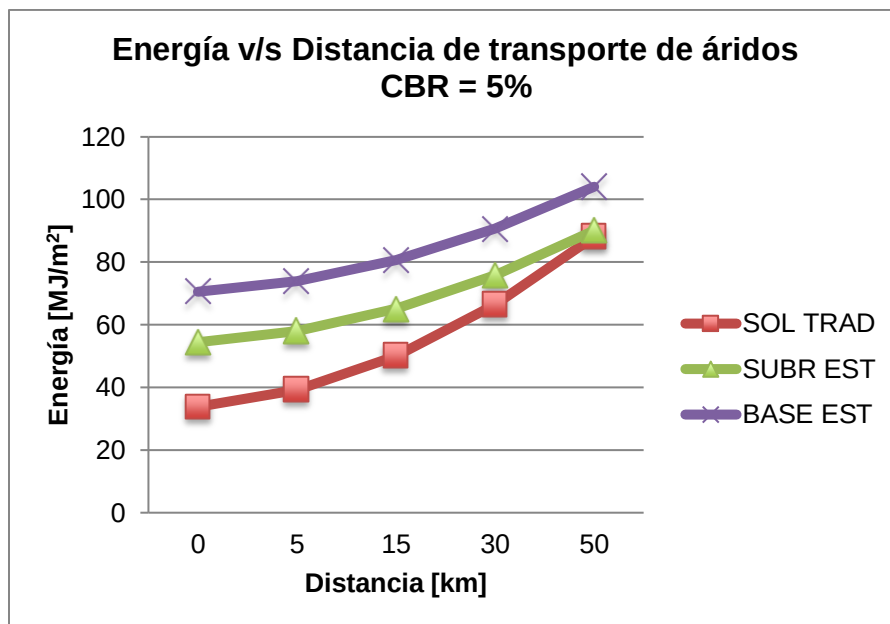


Figura 6.4 Gráfico energía v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 5% - clima normal.

Para suelos con calidad intermedia, representados por el CBR igual a 5%, se puede ver que los valores de energía requerida por metro cuadrado de camino forestal fluctúan entre 33,82 y 104,08 MJ/m², siendo nuevamente la solución con base estabilizada la menos eficiente energéticamente. En este caso la solución tradicional se presenta como la óptima desde el punto de vista energético, cualquiera sea la distancia de transporte, con valores entre 33,82 y 88,13 MJ/m².

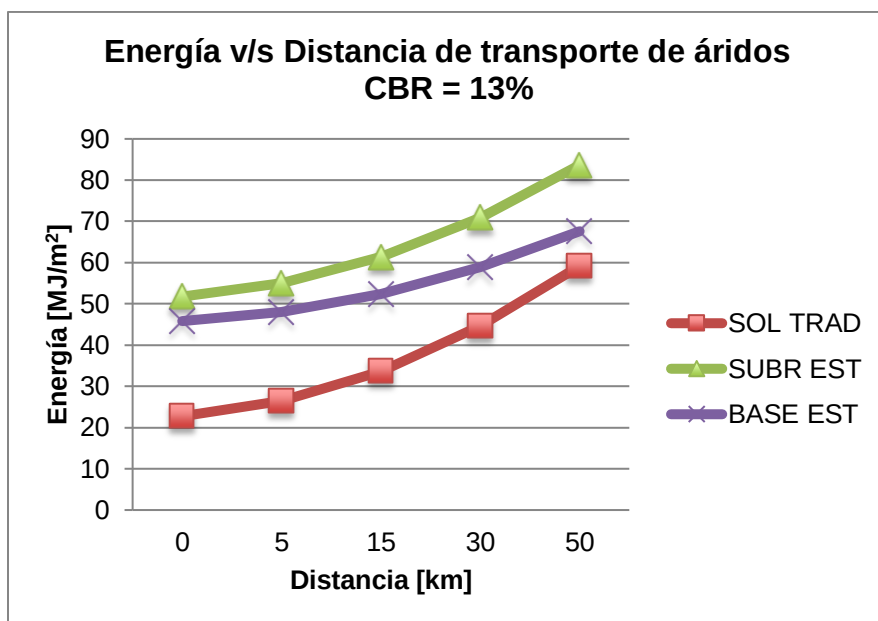


Figura 6.5 Gráfico energía v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 13% - clima normal.

Para suelos con buena capacidad de soporte, se puede ver que la cantidad de energía requerida para construir un metro cuadrado de camino forestal, varía entre 22,74 y 83,65 MJ/m², siendo la solución tradicional la más conveniente, sin importar la distancia a la que se encuentra el acopio de material granular, con valores entre 28,3 y 69,4 MJ/m², aproximadamente. Luego la sigue la solución con base estabilizada, con valores entre 48,82 y 67,59 MJ/m², aproximadamente. Y finalmente, a diferencia de los casos anteriores, con CBR 3% y 5%, la solución que requiere una mayor cantidad de energía corresponde a la con subrasante estabilizada.

Como era de esperar, a medida que mejora la calidad del suelo, la energía requerida por cualquiera de las soluciones va siendo cada vez menor, y la solución tradicional siempre se verá como una solución atractiva, ya que al no utilizar cemento en su construcción reduce significativamente el consumo energético. Sin embargo hay que notar que en casos de que el suelo tenga un coeficiente de soporte mediano o bajo, las soluciones con estabilizadores podrían ser una mejor opción desde el punto de vista energético.

6.2 PRODUCCIÓN DE CO₂ DEBIDA A LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES DE CAMINOS FORESTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS EN CLIMA NORMAL.

La Tabla 6.5 resume los parámetros estadísticos (valor mínimo, máximo, primer y tercer cuartil, mediana y media) de la producción de CO₂ para las diferentes combinaciones de escenarios, los cuales son graficados en un diagrama de caja y bigotes, como se muestra en la Figura 6.6.

Tabla 6.5 Parámetros estadísticos de la producción de CO₂ producido por las tres soluciones en los diferentes escenarios en clima normal (todos los valores en kg de CO₂/m² de camino forestal construido).

	Solución tradicional	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Cuartil 1	3,25	6,87	6,14
Mínimo	1,19	5,24	3,36
Mediana	4,86	8,10	7,64
Máximo	21,05	16,20	25,11
Cuartil 3	6,62	9,37	10,23
Media	5,42	8,26	8,74

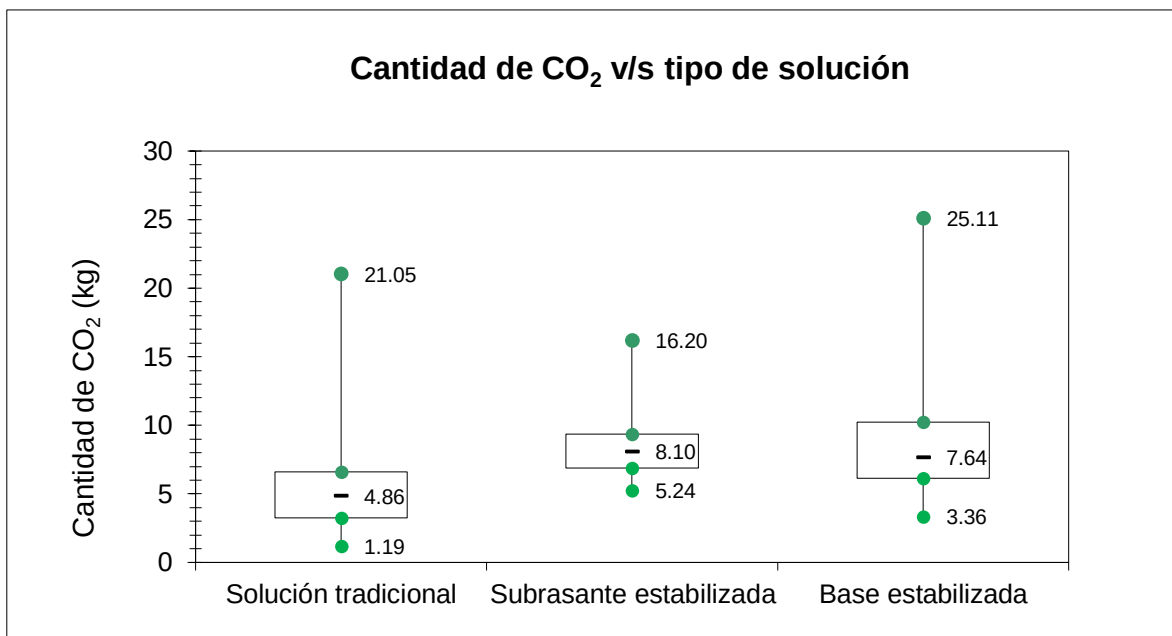


Figura 6.6 Diagrama de caja y bigotes para la cantidad de CO₂ emitida por las tres soluciones en diferentes escenarios en clima normal (Elaboración propia)

Se puede ver que la solución tradicional es la que presenta, mayoritariamente, una menor emanación de kg de CO₂, lo que era de esperar, ya que no hay consumo de agentes estabilizantes.

Sin embargo, para suelos de muy baja resistencia (CBR 1%, 2% y 3%) la solución con subrasante estabilizada se presenta como una solución menos contaminante, como se presenta en la Figura 6.7.

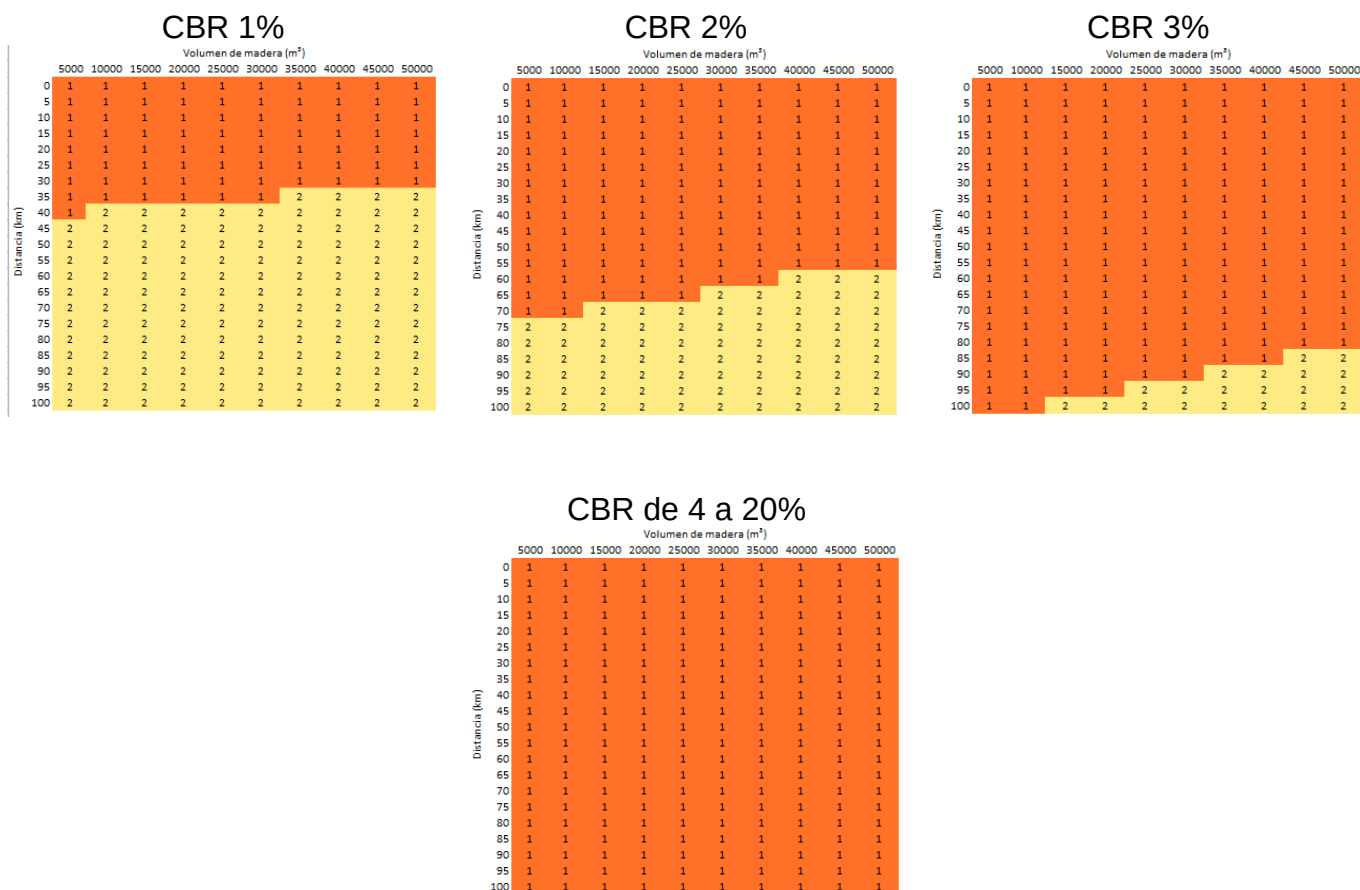


Figura 6.7 Soluciones estructurales que emanan una menor cantidad de CO₂ en su construcción.

Donde:

- 1 Representa la solución tradicional.
- 2 Representa la solución con subrasante estabilizada.

Donde se puede ver que la respuesta es más sensible a la distancia recorrida por los camiones desde el lugar de acopio de material granular al camino forestal que al volumen de madera a transportar.

Para analizar de manera más detallada cada caso, se comparan los resultados presentados en la Figura 6.7 con la diferencia porcentual que tienen las demás soluciones con respecto a la solución óptima. Se indica con un guion los casos que no son necesarios de comparar, porque ya corresponden a la solución de mínima energía.

Las tablas 6.6, 6.7 y 6.8 ejemplifican los casos para el suelo con CBR igual a 5%.

Tabla 6.6 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de CO₂ emanada – clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.7 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de CO₂ emanada – clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	159%	157%	154%	152%	149%	147%	144%	142%	140%	138%
	5	132%	129%	127%	125%	123%	121%	119%	117%	115%	114%
	10	111%	109%	107%	106%	104%	102%	100%	98%	97%	96%
	15	94%	93%	92%	90%	89%	87%	85%	84%	82%	81%
	20	81%	80%	79%	78%	76%	75%	73%	72%	71%	70%
	25	70%	69%	69%	68%	66%	65%	64%	62%	61%	60%
	30	61%	61%	60%	59%	58%	57%	56%	54%	53%	52%
	35	54%	53%	53%	52%	51%	50%	49%	48%	46%	46%
	40	47%	47%	47%	46%	45%	44%	43%	42%	41%	40%
	45	42%	41%	41%	41%	40%	39%	38%	37%	36%	35%
	50	37%	36%	36%	36%	35%	34%	33%	32%	31%	31%
	55	32%	32%	32%	32%	31%	30%	29%	28%	27%	27%
	60	28%	28%	28%	28%	27%	26%	26%	25%	24%	23%
	65	25%	25%	25%	25%	24%	23%	23%	22%	21%	20%
	70	22%	22%	22%	22%	21%	20%	20%	19%	18%	18%
	75	19%	19%	19%	19%	19%	18%	17%	16%	16%	15%
	80	16%	17%	17%	17%	16%	15%	15%	14%	13%	13%
	85	14%	14%	15%	14%	14%	13%	13%	12%	11%	11%
	90	12%	12%	13%	12%	12%	11%	11%	10%	9%	9%
	95	10%	10%	11%	11%	10%	9%	9%	8%	8%	7%
	100	8%	8%	9%	9%	8%	8%	7%	7%	6%	6%

Tabla 6.8 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de CO₂ emanada – clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	242%	245%	248%	249%	249%	249%	249%	249%	248%	248%
	5	202%	205%	207%	208%	209%	209%	209%	208%	208%	207%
	10	173%	175%	177%	178%	178%	178%	178%	178%	177%	177%
	15	149%	151%	153%	154%	154%	154%	154%	154%	153%	153%
	20	131%	133%	134%	135%	135%	135%	135%	135%	134%	134%
	25	115%	117%	119%	119%	120%	119%	119%	119%	119%	119%
	30	102%	104%	106%	106%	107%	106%	106%	106%	106%	106%
	35	92%	93%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
	40	82%	84%	85%	86%	86%	86%	86%	86%	85%	85%
	45	74%	76%	77%	78%	78%	78%	78%	77%	77%	77%
	50	67%	69%	70%	70%	71%	70%	70%	70%	70%	70%
	55	61%	62%	63%	64%	64%	64%	64%	64%	63%	64%
	60	55%	57%	58%	58%	59%	58%	58%	58%	58%	58%
	65	50%	52%	53%	53%	53%	53%	53%	53%	53%	53%
	70	46%	47%	48%	49%	49%	49%	49%	49%	48%	48%
	75	42%	43%	44%	45%	45%	45%	45%	44%	44%	44%
	80	38%	39%	40%	41%	41%	41%	41%	41%	40%	40%
	85	35%	36%	37%	38%	38%	37%	37%	37%	37%	37%
	90	32%	33%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%
	95	29%	30%	31%	31%	32%	31%	31%	31%	31%	31%
	100	26%	27%	28%	29%	29%	29%	29%	29%	28%	28%

De los porcentajes presentados en las tablas 6.6, 6.7 y 6.8, se puede ver que las diferencias no son significativas para la cantidad de madera a transportar, pero si se puede notar una diferencia a medida que varía la distancia de transporte de material granular, por lo que se realizará el análisis para un volumen de 30.000 m³ de madera transportada, para distancias de transporte de áridos 0, 5, 15, 30 y 50 km y CBR igual a 3%, 5% y 13%, que representan suelos de baja, mediana y buena calidad en el sector forestal. Los resultados se muestran en las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10.

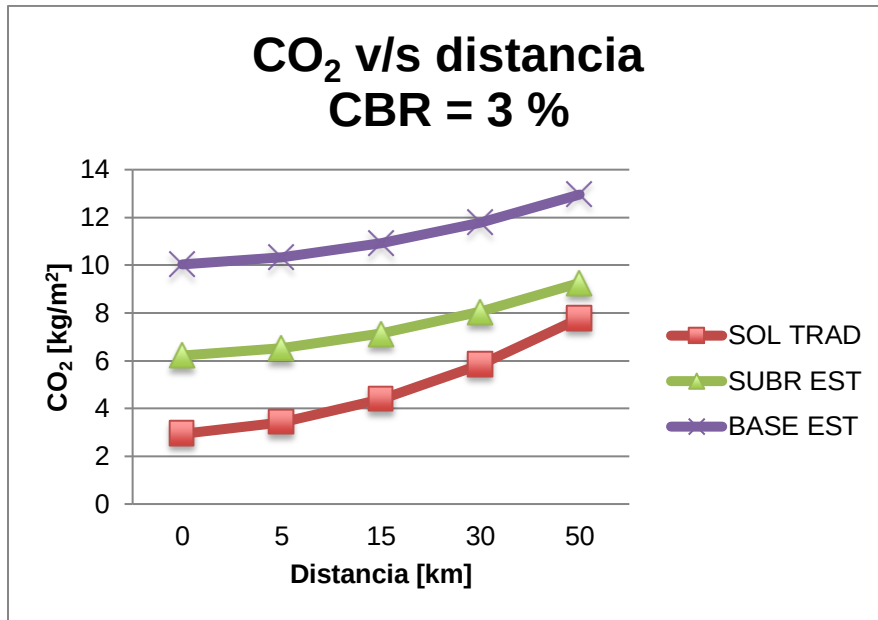


Figura 6.8 Gráfico CO₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 3%. - clima normal.

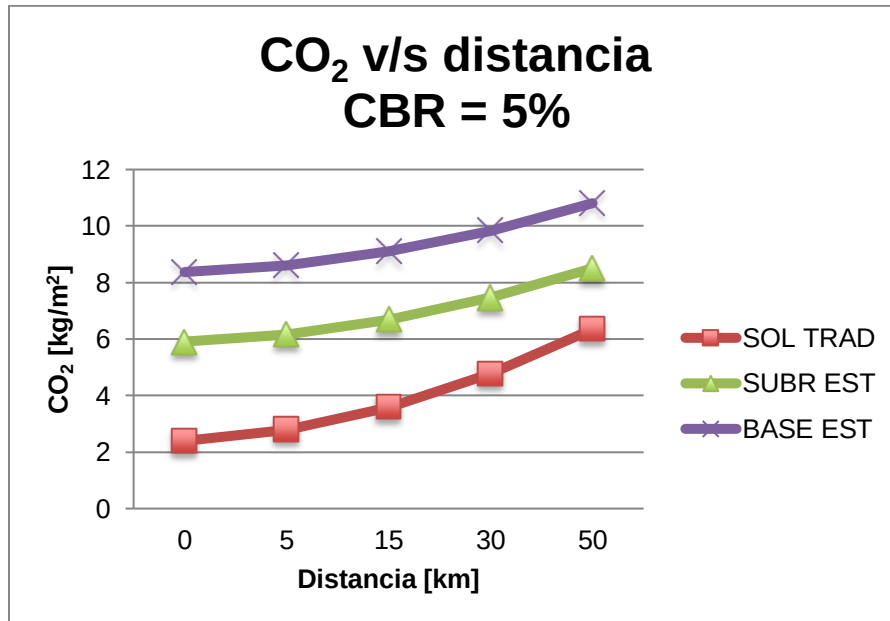


Figura 6.9 Gráfico CO₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 5% - clima normal.

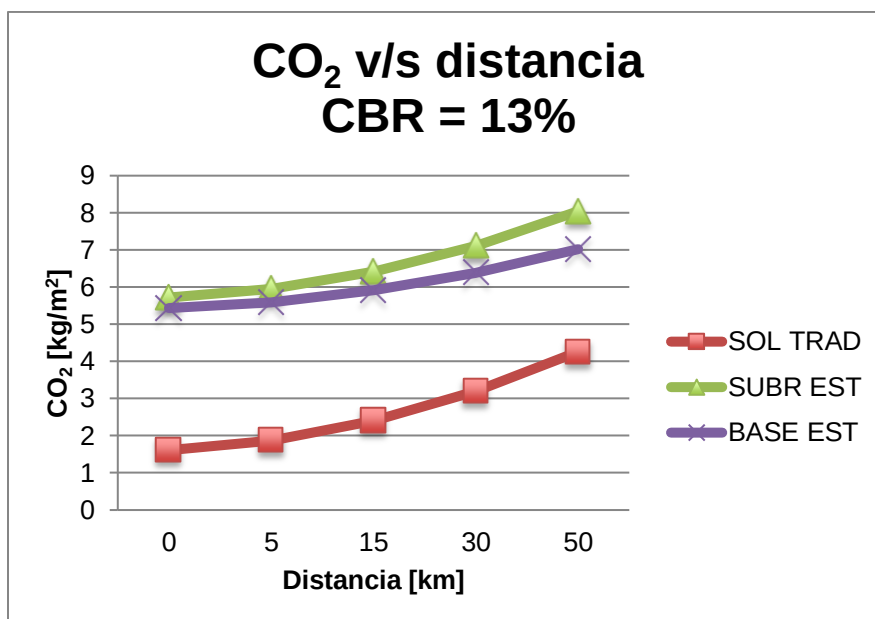


Figura 6.10 Gráfico CO₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 13% - clima normal.

Se puede ver que, a modo general, la solución tradicional es la que presenta una menor cantidad de emanación de CO₂ emitida, y que para suelos de baja y mediana calidad, la segunda solución óptima siempre está dada por la que presenta una subrasante estabilizada.

A medida que mejora la calidad del suelo, la solución con una base estabilizada pasa a ser una solución con una menor cantidad de emisión de CO₂ que la con subrasante estabilizada.

6.3 CONSUMO DE ÁRIDOS DEBIDO A LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES DE CAMINOS FORESTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS EN CLIMA NORMAL.

Como el material granular es producto de la explotación de un recurso natural, el cual es de carácter finito, al ser limitante en la planificación de un proyecto forestal, es de interés en el estudio cuantificar la cantidad utilizada de este por las diferentes soluciones, en los diferentes escenarios, por lo cual la tabla 6.9 resume los valores mínimos, máximos, del primer y tercer cuartil, las medianas y las medias de la cantidad de material granular requerido por las diferentes soluciones estructurales en los diferentes escenarios, los cuales son representados en el diagrama de caja y bigotes presentado en la Figura 6.11.

Tabla 6.9 Parámetros estadísticos de la cantidad de material granular a utilizar por las tres soluciones en los diferentes escenarios en clima norma (todos los valores en m³/m² de camino forestal construido).

	Solución tradicional	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Cuartil 1	0,21	0,18	0,15
Mínimo	0,17	0,14	0,11
Mediana	0,25	0,20	0,18
Máximo	0,69	0,39	0,50
Cuartil 3	0,32	0,22	0,25
Media	0,29	0,21	0,21

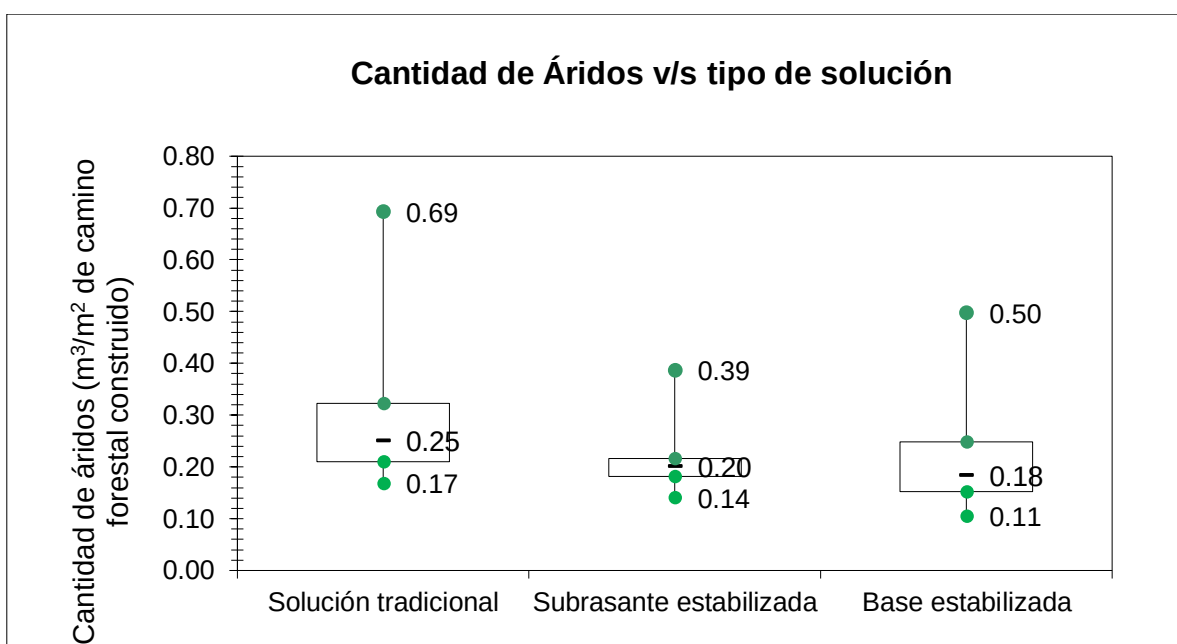


Figura 6.11 Diagrama de caja y bigotes para la cantidad de árido requerida en los diferentes escenarios en clima normal

Haciendo un análisis caso a caso, para poder determinar qué solución es la más conveniente, se obtiene que para CBR inferiores a 9, siempre es más conveniente la solución con subrasante estabilizada, y para CBR mayores, la solución con base estabilizada requiere un menor consumo de material granular.

En la figura 6.12 se representa la distribución de las soluciones más convenientes en función de la distancia entre el lugar de acopio del material granular hasta el lugar de

construcción del camino forestal y el volumen de madera a transportar, para suelos con un CBR igual a 9.

	Volumen de madera (m ³)									
	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
0	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
15	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
20	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
25	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
30	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
35	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
40	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
45	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
50	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
55	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
60	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
65	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
70	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
75	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
80	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
85	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
90	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
95	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
100	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Figura 6.12 Soluciones estructurales que requieren un menor consumo de áridos para su construcción.

Donde:

2	Representa la solución con subrasante estabilizada.
3	Representa la solución con la base estabilizada.

Donde es posible notar que la cantidad de árido no es dependiente de la distancia de transporte de áridos, si no que del volumen de madera a transportar, donde para valores inferiores a 10.000 m³ de madera es más conveniente utilizar la solución estructural con subrasante estabilizada, y por el contrario, si el volumen de madera a transportar es mayor a 10.000 m³, es mejor la solución con base estabilizada.

Para analizar de manera más detallada cada caso, se comparan los resultados presentados en la Figura 6.12 con la diferencia porcentual que tienen las demás soluciones con respecto a la solución óptima. Se indica con un guion los casos que no son necesarios de comparar, porque ya corresponden a la solución de mínima energía.

Las tablas 6.10, 6.11 y 6.12 ejemplifican los casos para el suelo con CBR igual a 5%.

Tabla 6.10 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de áridos – clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	5	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	10	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	15	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	20	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	25	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	30	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	35	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	40	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	45	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	50	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	55	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	60	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	65	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	70	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	75	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	80	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	85	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	90	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	95	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%
	100	61%	57%	54%	53%	52%	51%	51%	52%	52%	53%

Tabla 6.11 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de áridos – clima normal.

		Volumen de madera (m³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.12 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5%, para la cantidad de áridos– clima normal.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	5	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	10	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	15	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	20	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	25	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	30	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	35	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	40	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	45	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	50	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	55	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	60	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	65	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	70	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	75	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	80	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	85	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	90	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	95	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	100	22%	21%	19%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%

Se puede ver que las diferencias porcentuales varían entre un 18% y un 68%, siendo más grandes las diferencias cuando la cantidad de volumen de madera a transportar es mayor.

Evidentemente, los gráficos reflejan que el volumen de madera a transportar, no influye en la cantidad de áridos a utilizar en la construcción del camino forestal, por lo que se realiza un análisis de sensibilidad al volumen de madera transportada para una calidad de suelo mala, mediana y buena, representadas por los CBR 3%, 5% y 13%, respectivamente, los cuales se representan en las figuras 6.16, 6.17 y 6.18.

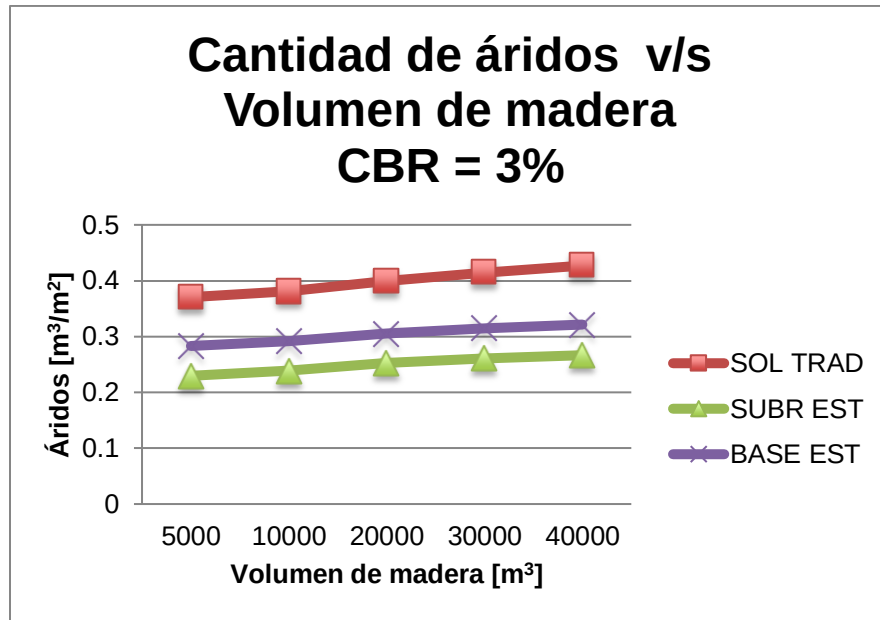


Figura 6.13 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 3% - clima normal.

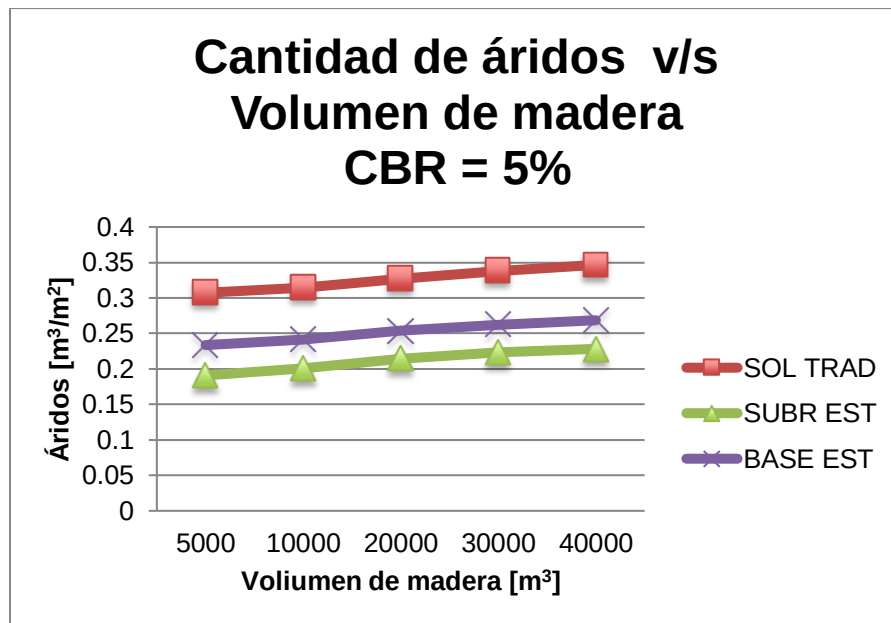


Figura 6.14 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 5% - clima normal.

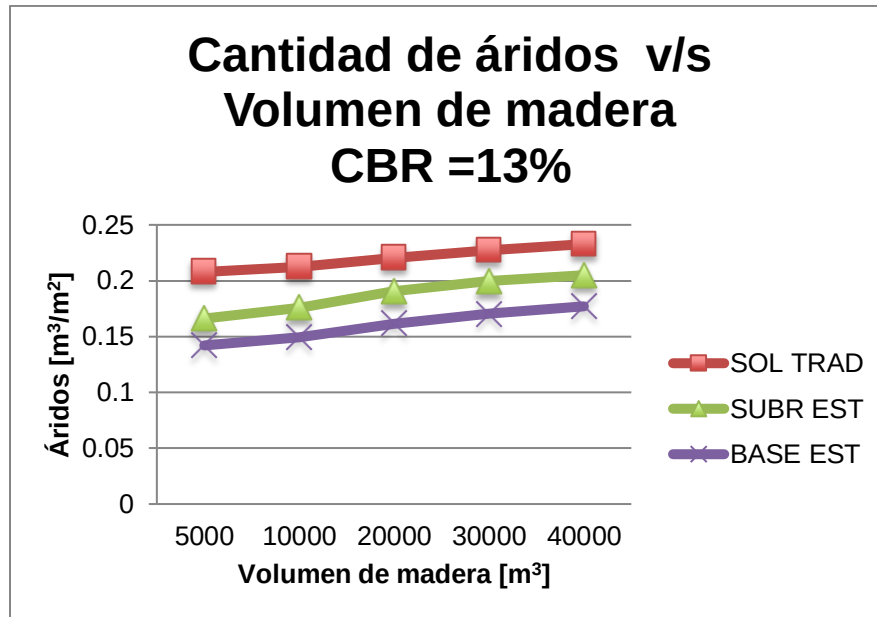


Figura 6.15 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 13% - clima normal.

En los gráficos anteriores se puede ver que la solución tradicional es siempre la que utiliza una mayor cantidad de áridos, comparándola con las soluciones que utilizan cemento como agente estabilizador, y que para suelos de calidad baja y media, la solución con subrasante estabilizada es la que consume una menor cantidad de áridos, pero para suelos con calidad mayor, la solución con base estabilizada pasa a ser una solución más conveniente.

6.4 ENERGÍA REQUERIDA POR CADA TIPO DE SOLUCIÓN ESTRUCTURAL PARA DIFERENTES CONDICIONES EN CLIMA LLUVIOSO.

Para poder visualizar de mejor manera los resultados obtenidos, se lleva a cabo un análisis descriptivo con un diagrama de caja y bigote, el cual es de utilidad para representar de manera gráfica la variabilidad de los datos de la muestra, para lo cual se obtiene el valor mínimo, máximo, el primer, segundo (mediana), y tercer cuartil, y la media aritmética, como se presenta en la tabla 6.13, cuyo gráfico se presenta en la figura 6.19.

Tabla 6.13 Parámetros estadísticos para la energía requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios para clima lluvioso (todos los valores en MJ/m² de camino forestal construido).

	Solución tradicional	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Cuartil 1	50,78	70,42	62,78
Mínimo	19,03	47,15	32,30
Mediana	75,64	88,86	79,93
Máximo	334,68	216,24	274,36
Cuartil 3	103,70	107,22	107,35
Media	84,86	91,30	90,97

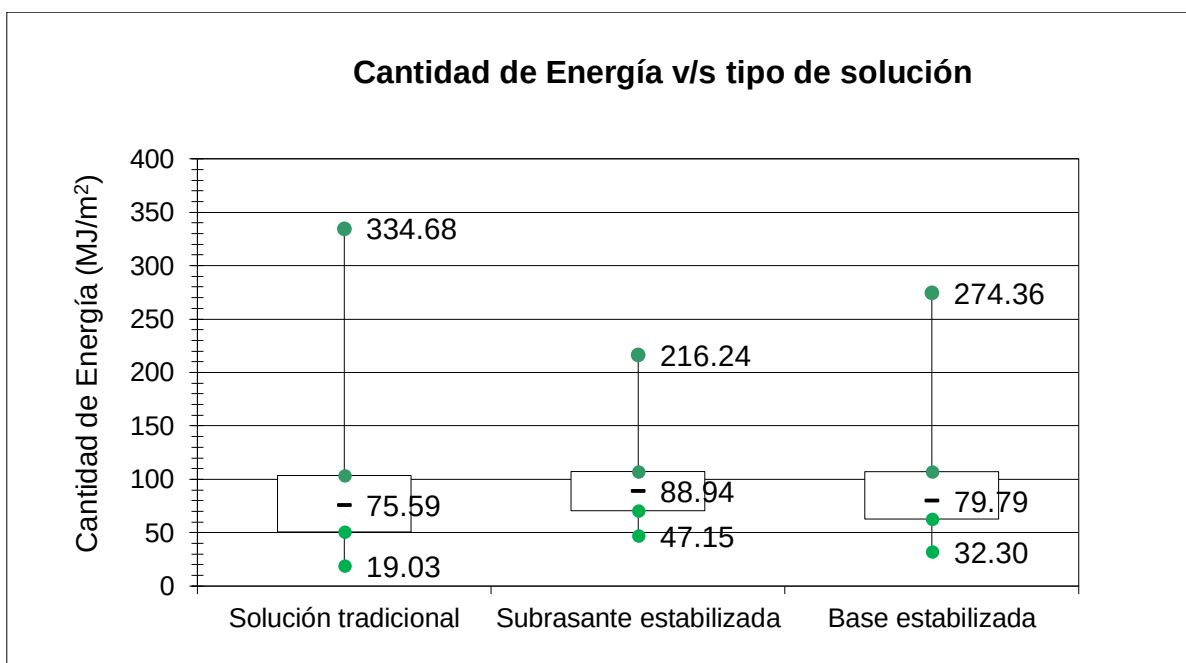


Figura 6.16 Diagrama de caja y bigotes para la energía requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios para clima lluvioso (Elaboración propia).

Se puede ver que la solución con un menor consumo energético promedio es la solución tradicional, sin embargo todas se comportan de manera similar.

La solución tradicional es la que presenta un mayor rango en los valores de energía: entre 19,03 a 334,68 MJ/m³, por lo que es necesario realizar un análisis caso a caso, lo que se presenta en la figura 6.20.

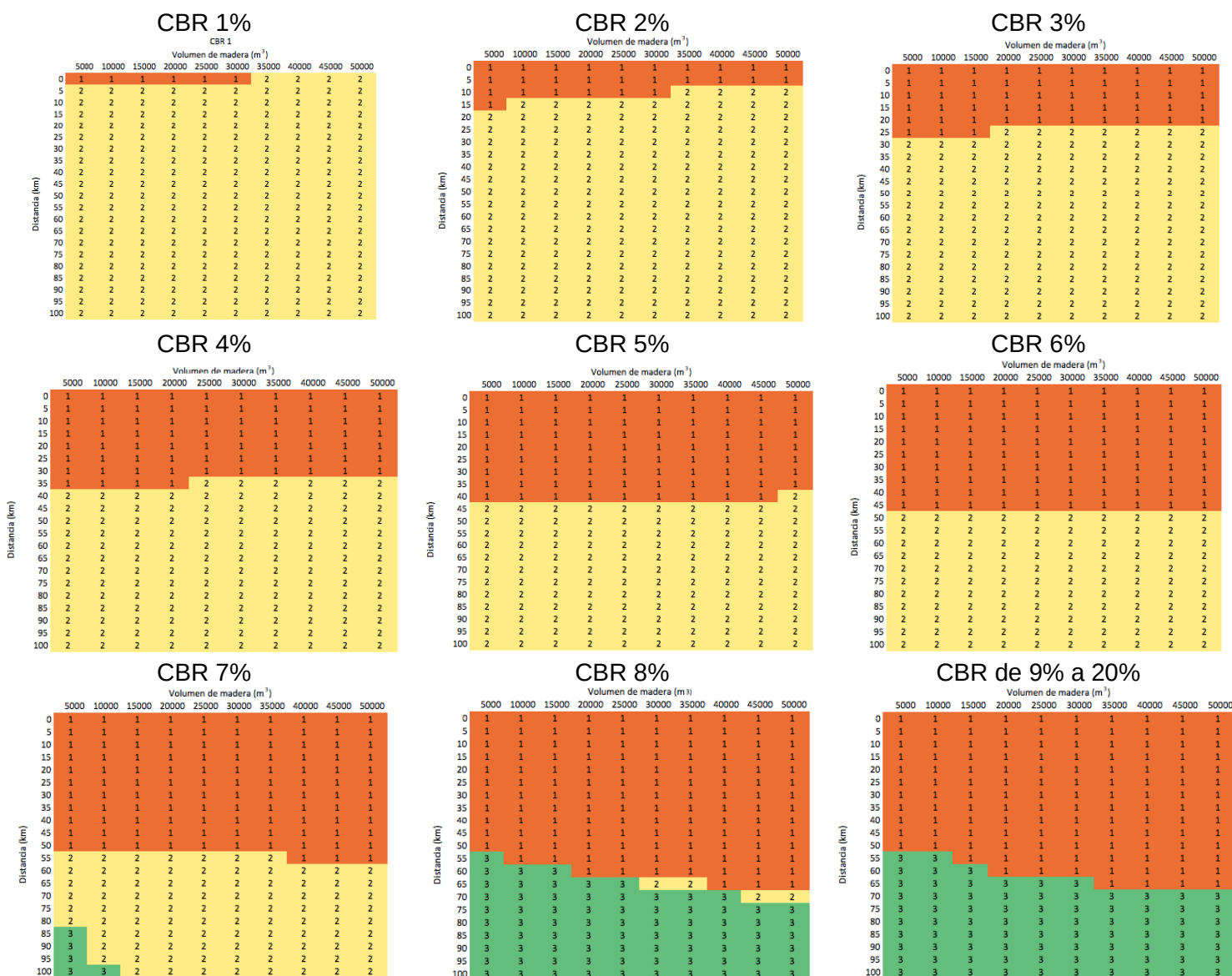


Figura 6.17 Soluciones estructurales que requieren una menor energía para su construcción. (Elaboración propia)

Donde

- 1** Representa la solución tradicional.
- 2** Representa la solución con subrasante estabilizada.
- 3** Representa la solución con la base estabilizada.

De lo cual es posible notar que, al igual que en la condición de clima normal, la energía requerida no es considerablemente sensible al volumen de madera a transportar, si no que a la distancia de transporte de material granular, donde para suelos con un CBR inferior a 7 solo se presentan como alternativas la solución tradicional y la con subrasante estabilizada.

Además mientras mejor es la calidad del suelo, es decir este presenta un mayor valor de CBR, la solución tradicional va siendo cada vez mas eficiente en términos energéticos, posicionándose como la solución óptima para suelos con CBR mayor a 6, y una distancia de transporte de áridos menor a 50 km.

Para suelos con CBR mayor o igual a 9 el comportamiento se estabiliza, pudiendo observar que la solución con base estabilizada es siempre más eficiente para distancias de transportes mayores a 70 km,

Si bien los gráficos presentados en la figura 6.19 son robustos, ya que no indican qué tanto mejor son con respecto a las otras alternativas. Las tablas 6.11, 6.12 y 6.13 presentan la diferencia porcentual de la solución de energía mínima con respecto a la solución tradicional, a la subrasante estabilizada y a la base estabilizada, respectivamente para el CBR igual a 5%.

Tabla 6.14 Diferencia porcentual de la solución de energía mínima para CBR=5 con respecto a la solución tradicional – clima lluvioso.

		Volumen de madera (m ³)								
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	50.000
Distancia (km)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
	45	0%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	3%
	50	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%
	55	5%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%
	60	7%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	9%
	65	9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%
	70	11%	11%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
	75	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	14%
	80	14%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
	85	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	17%
	90	17%	17%	18%	17%	17%	18%	17%	17%	18%
	95	18%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%	19%
	100	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%

Tabla 6.15 Diferencia porcentual de la solución de energía mínima para CBR=5 con respecto a la solución con subrasante estabilizada – clima lluvioso.

		Volumen de madera									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	54%	52%	51%	50%	49%	48%	47%	47%	46%	46%
	5	41%	40%	39%	38%	37%	36%	36%	35%	35%	35%
	10	32%	30%	29%	29%	28%	28%	27%	27%	26%	26%
	15	24%	23%	22%	22%	21%	21%	20%	20%	20%	19%
	20	18%	17%	16%	16%	15%	15%	15%	14%	14%	14%
	25	13%	12%	12%	11%	11%	10%	10%	10%	10%	9%
	30	9%	8%	7%	7%	7%	6%	6%	6%	6%	6%
	35	5%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	2%
	40	2%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	-
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.16 Diferencia porcentual de la solución de energía mínima para CBR=5 con respecto a la solución con base estabilizada – clima lluvioso.

		Volumen de madera									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	98%	100%	100%	100%	101%	101%	101%	100%	100%	100%
	5	79%	80%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%
	10	65%	65%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%
	15	53%	54%	54%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	54%
	20	44%	45%	45%	46%	46%	46%	46%	46%	45%	45%
	25	36%	37%	37%	38%	38%	38%	38%	38%	38%	38%
	30	30%	31%	31%	32%	32%	32%	32%	32%	31%	31%
	35	25%	25%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%
	40	20%	21%	21%	21%	22%	21%	22%	21%	21%	21%
	45	17%	18%	19%	19%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
	50	16%	17%	18%	18%	19%	19%	19%	19%	19%	19%
	55	15%	16%	17%	17%	18%	18%	18%	18%	18%	18%
	60	14%	15%	16%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%
	65	14%	15%	15%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%
	70	13%	14%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
	75	13%	13%	14%	14%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
	80	12%	13%	13%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%
	85	12%	12%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%
	90	11%	12%	12%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%
	95	11%	11%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
	100	10%	11%	11%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	11%

Por lo cual, al igual que en el caso del clima normal, es posible verificar las ventajas comparativas con las demás soluciones, y así poder tomar una decisión considerando más aristas del problema, como por ejemplo la cantidad de áridos a utilizar.

Al notar que la solución estructural del camino forestal de explotación no es significativamente sensible al volumen de madera transportada, se realiza el análisis de sensibilidad a la distancia de transporte de material granular.

Se realizará el análisis para un volumen de 30.000 m³ de madera transportada, para distancias de transporte de 0, 5, 15, 30 y 50 km y CBR igual a 3, 5 y 13, que representan suelos de baja, mediana y buena calidad en el sector forestal. Los resultados se muestran en las figuras 6.21, 6.22 y 6.23.

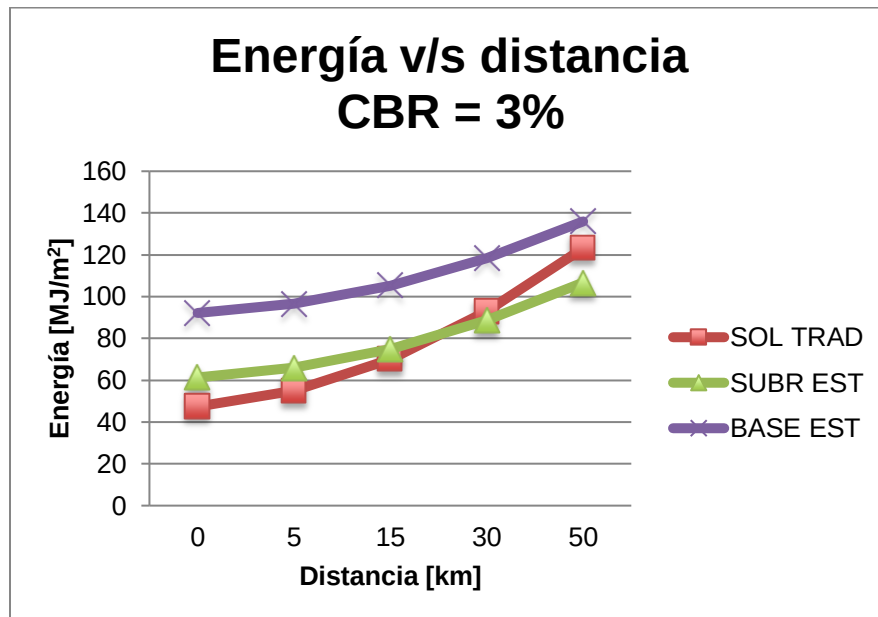


Figura 6.18 Gráfico energía v/s distancia de acopio de material granular, para un CBR igual a 3% – clima lluvioso.

Se puede ver que para suelos de baja calidad, la energía requerida para construir un metro cuadrado de camino forestal oscila entre 47,40 y 136,0 MJ, siendo la solución con base estabilizada la menos conveniente para cualquiera de las distancias. Además es posible notar que para distancias de transporte de material granular inferiores a 23,13 km, es más conveniente, desde el punto de vista energético, la solución tradicional, con valores entre 47,40 y 82,31 MJ, aproximadamente; mientras que para distancias mayores, es más conveniente la solución con subrasante estabilizada, con valores entre 82,31 y 136,00 MJ, aproximadamente.

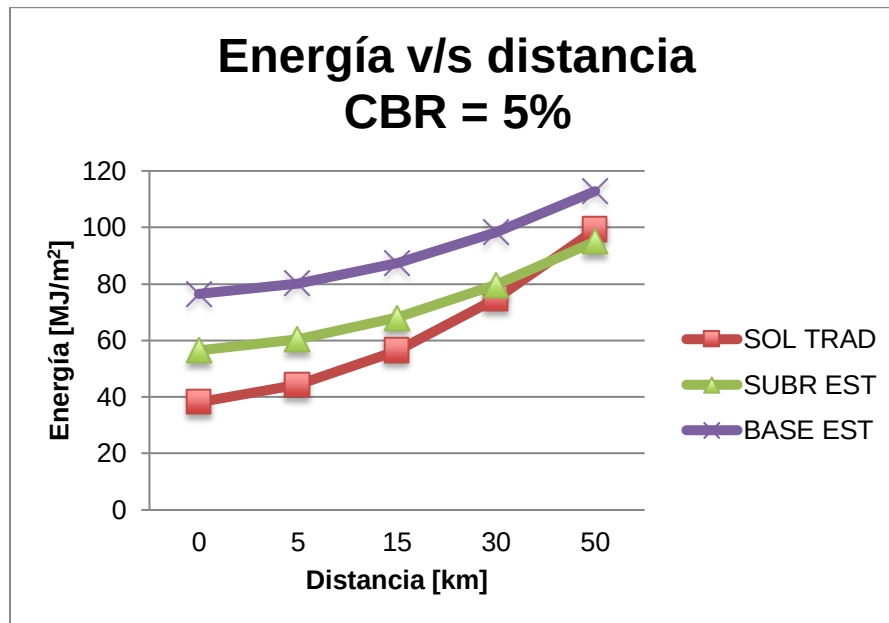


Figura 6.19 Gráfico energía v/s distancia de acopio de material granular, para un CBR igual a 5% – clima lluvioso.

Para suelos con calidad intermedia, representados por el CBR igual a 5, se puede ver que los valores de energía requerida por metro cuadrado de camino forestal fluctúan entre 38,12 y 112,84 MJ, siendo nuevamente la solución con base estabilizada la menos eficiente energéticamente, y para distancias de transporte de material granular inferiores a 45 km, es más conveniente, desde el punto de vista energético, la solución tradicional, con un rango de energía entre 42,3 y 97,0 MJ, aproximadamente; mientras que para distancias mayores, es más conveniente la solución con subrasante estabilizada, con una energía entre 97,0 y 103,7 MJ, aproximadamente.

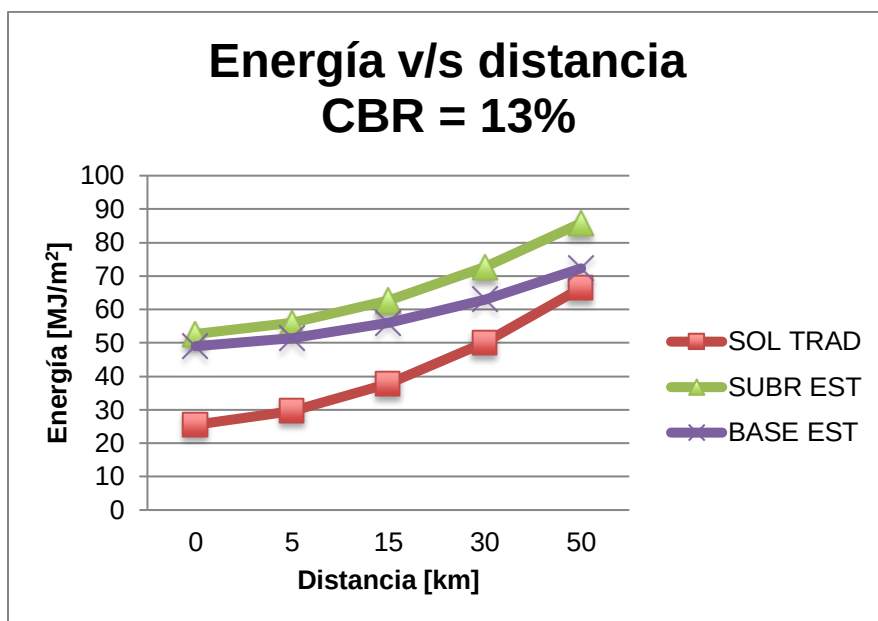


Figura 6.20 Gráfico energía v/s distancia de acopio de material granular, para un CBR igual a 13% – clima lluvioso.

Para suelos con buena capacidad de soporte, se puede ver que la cantidad de energía requerida para construir un metro cuadrado de camino forestal, oscila entre 28,3 y 91,6 MJ, siendo la solución tradicional la más conveniente, sin importar la distancia a la que se encuentra el acopio de material granular, con valores entre 28,3 y 69,4 MJ/m², aproximadamente. Luego la sigue la solución con base estabilizada, con valores entre 54,5 y 78,0 MJ/m², aproximadamente. Y finalmente, a diferencia de los casos anteriores, con CBR 3 y 5, la solución que requiere una mayor cantidad de energía corresponde a la con subrasante estabilizada.

Como era de esperar, a medida que mejora la calidad del suelo, la energía requerida por cualquiera de las soluciones va siendo cada vez menor, y la solución tradicional siempre se verá como una solución atractiva, ya que al no utilizar cemento en su construcción reduce significativamente el consumo energético. Sin embargo hay que notar que en casos de que el suelo tenga un coeficiente de soporte mediano o bajo, las soluciones con estabilizadores podrían ser una mejor opción desde el punto de vista energético.

6.5 PRODUCCIÓN DE CO₂ DEBIDA A LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES DE CAMINOS FORESTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS.

La tabla 6.17 resume los parámetros estadísticos (valor mínimo, máximo, primer y tercer cuartil, mediana y media) de la producción de CO₂ para las diferentes combinaciones de escenarios, los cuales son graficados en un diagrama de caja y bigotes, como se muestra en la figura 6.24.

Tabla 6.17 Parámetros estadísticos de la producción de CO₂ producido por las tres soluciones en los diferentes escenarios (todos los valores en kg de CO₂/m² de camino forestal construido).

	Solución tradicional	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Cuartil 1	3,64	7,07	6,67
Mínimo	1,35	5,39	3,83
Mediana	5,45	8,42	8,21
Máximo	24,20	17,64	26,42
Cuartil 3	7,48	9,76	11,06
Media	84,86	91,30	90,97

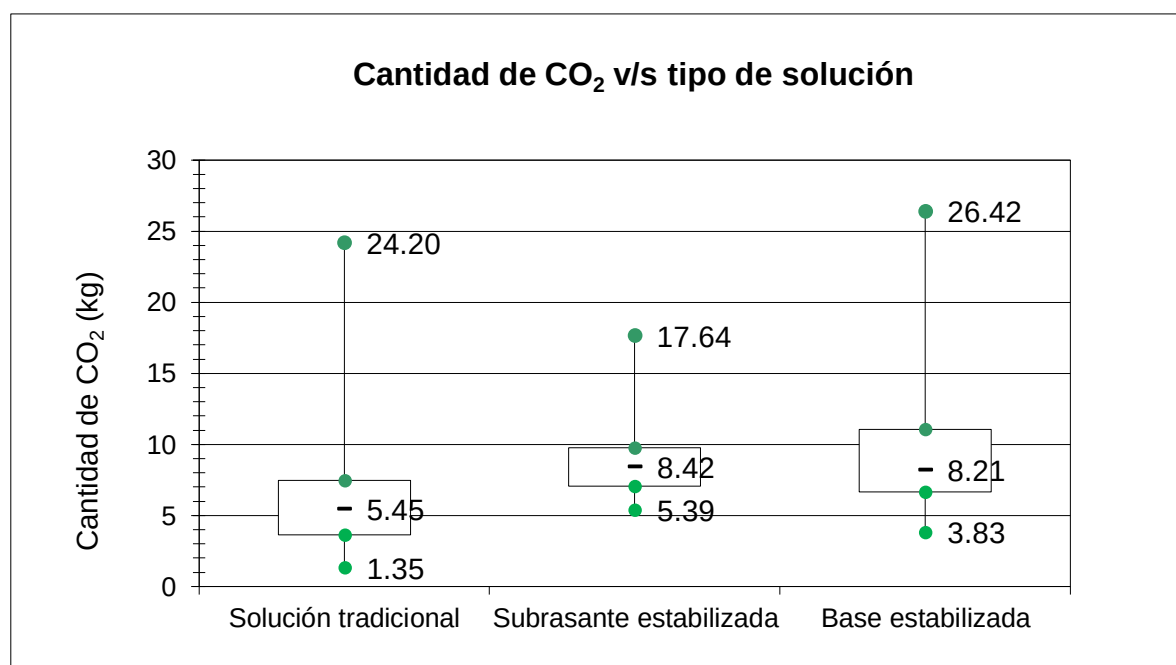


Figura 6.21: Diagrama de caja y bigotes para la producción de CO₂ por las tres soluciones en los diferentes escenarios – clima lluvioso

Al igual que en los casos anteriores, la solución tradicional es la que presenta una con una menor emanación de kg de CO₂ en comparación con las soluciones que utilizan estabilizadores.

Analizando los resultados para los diferentes valores de CBR, se puede apreciar que para distancias de traslado de madera superiores a 30, 55, 80 y 95 km, para CBR igual a 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente, la solución con subrasante pasa a ser la solución que requiere una menor cantidad de energía para su construcción, como se puede ver en la figura 6.25.

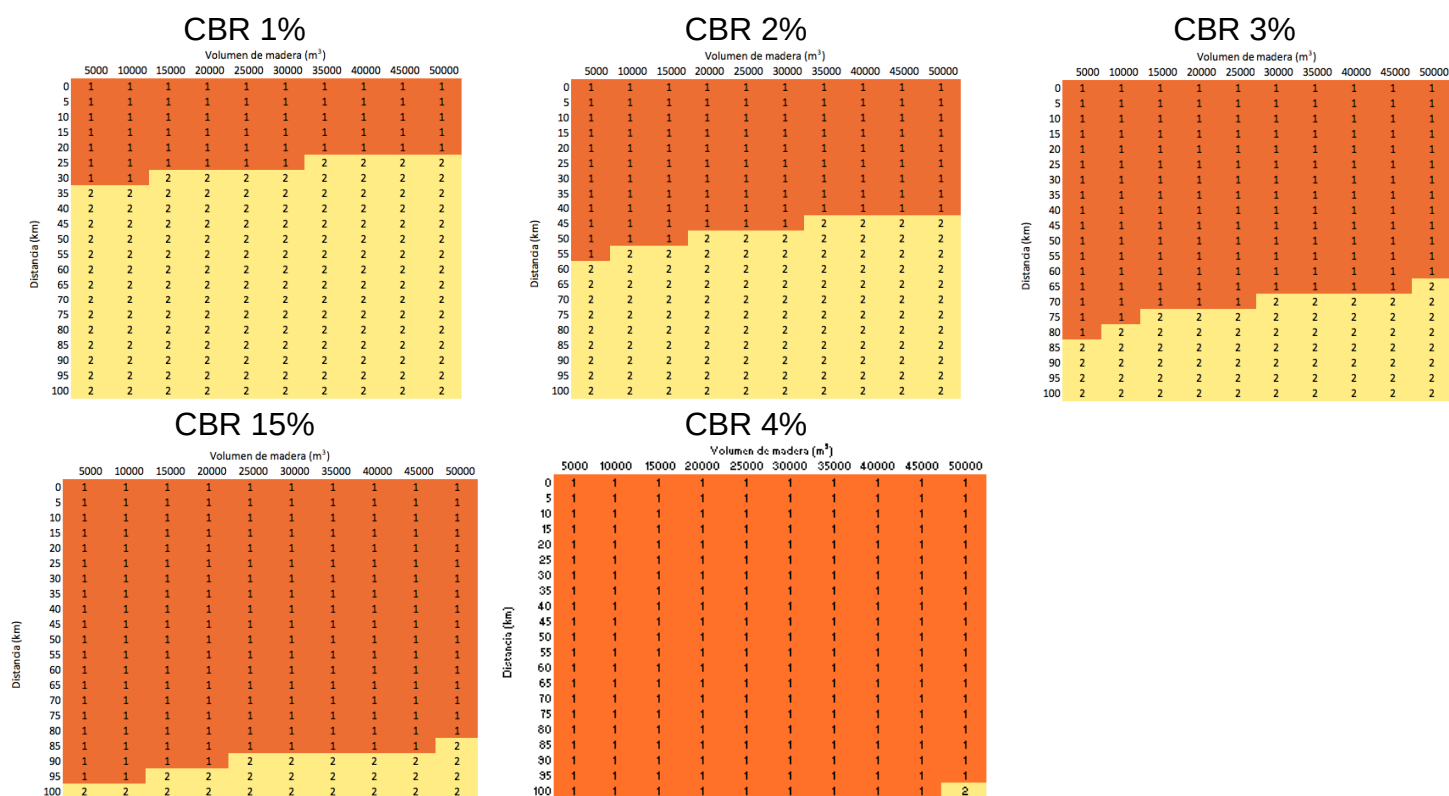


Figura 6.22 Soluciones estructurales que requieren una menor energía para su construcción.

Donde:

- 1 Representa la solución tradicional.
- 2 Representa la solución con subrasante estabilizada.

Para analizar de manera más detallada cada caso, se comparan los resultados presentados en la Figura 6.25 con la diferencia porcentual que tienen las demás soluciones con respecto a la solución óptima. Se indica con un guion los casos que no son necesarios de comparar, porque ya corresponden a la solución de mínima energía.

Las tablas 6.18, 6.19 y 6.20 ejemplifican los casos para el suelo con CBR igual a 5%.

Tabla 6.18 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5% – clima lluvioso.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0%

Tabla 6.19 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% – clima lluvioso.

		Volumen de madera (m³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	138%	134%	131%	128%	126%	124%	123%	121%	120%	119%
	5	113%	110%	107%	105%	103%	101%	100%	99%	98%	97%
	10	94%	92%	89%	87%	86%	84%	83%	82%	81%	81%
	15	80%	77%	75%	74%	72%	71%	70%	69%	69%	68%
	20	68%	66%	64%	63%	61%	60%	60%	59%	58%	57%
	25	58%	56%	55%	54%	53%	52%	51%	50%	50%	49%
	30	50%	49%	47%	46%	45%	44%	44%	43%	43%	42%
	35	44%	42%	41%	40%	39%	38%	38%	37%	36%	36%
	40	38%	36%	35%	34%	34%	33%	32%	32%	31%	31%
	45	33%	31%	30%	30%	29%	28%	28%	27%	27%	26%
	50	28%	27%	26%	25%	25%	24%	24%	23%	23%	22%
	55	24%	23%	22%	22%	21%	20%	20%	20%	19%	19%
	60	21%	20%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%	16%
	65	18%	17%	16%	16%	15%	14%	14%	14%	14%	13%
	70	15%	14%	13%	13%	12%	12%	12%	11%	11%	11%
	75	13%	11%	11%	11%	10%	10%	9%	9%	9%	9%
	80	10%	9%	9%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	6%
	85	8%	7%	7%	6%	6%	6%	5%	5%	5%	5%
	90	6%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	3%	3%
	95	4%	4%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	1%
	100	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	-

Tabla 6.20 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% – clima lluvioso.

		Volumen de madera (m ³)									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	232%	234%	235%	236%	236%	236%	236%	236%	236%	235%
	5	194%	195%	196%	197%	197%	197%	197%	197%	197%	196%
	10	165%	166%	167%	167%	168%	168%	168%	168%	167%	167%
	15	142%	143%	144%	145%	145%	145%	145%	145%	144%	144%
	20	124%	125%	126%	126%	126%	126%	126%	126%	126%	126%
	25	109%	110%	111%	111%	111%	111%	111%	111%	111%	111%
	30	97%	97%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%
	35	86%	87%	87%	88%	88%	88%	88%	88%	88%	88%
	40	77%	78%	78%	79%	79%	79%	79%	79%	79%	78%
	45	69%	70%	70%	71%	71%	71%	71%	71%	71%	71%
	50	62%	63%	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%	64%
	55	56%	57%	57%	58%	58%	58%	58%	58%	58%	58%
	60	51%	52%	52%	53%	53%	53%	53%	53%	52%	52%
	65	46%	47%	47%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	47%
	70	42%	42%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%
	75	38%	38%	39%	39%	39%	39%	39%	39%	39%	39%
	80	34%	35%	35%	36%	36%	36%	36%	36%	36%	35%
	85	31%	32%	32%	32%	33%	32%	33%	32%	32%	32%
	90	28%	28%	29%	29%	30%	29%	30%	29%	29%	29%
	95	25%	26%	26%	27%	27%	27%	27%	27%	26%	26%
	100	23%	23%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%

Al notar que la solución estructural del camino forestal de explotación no es significativamente sensible al volumen de madera transportada, se realiza el análisis de sensibilidad a la distancia de transporte de material granular.

Se realizará el análisis para un volumen de 30.000 m³ de madera transportada, para distancias de transporte de áridos 0, 5, 15, 30 y 50 km y CBR igual a 3%, 5% y 13%, que representan suelos de baja, mediana y buena calidad en el sector forestal. Los resultados se muestran en las Figuras 6.26, 6.27 y 6.28.

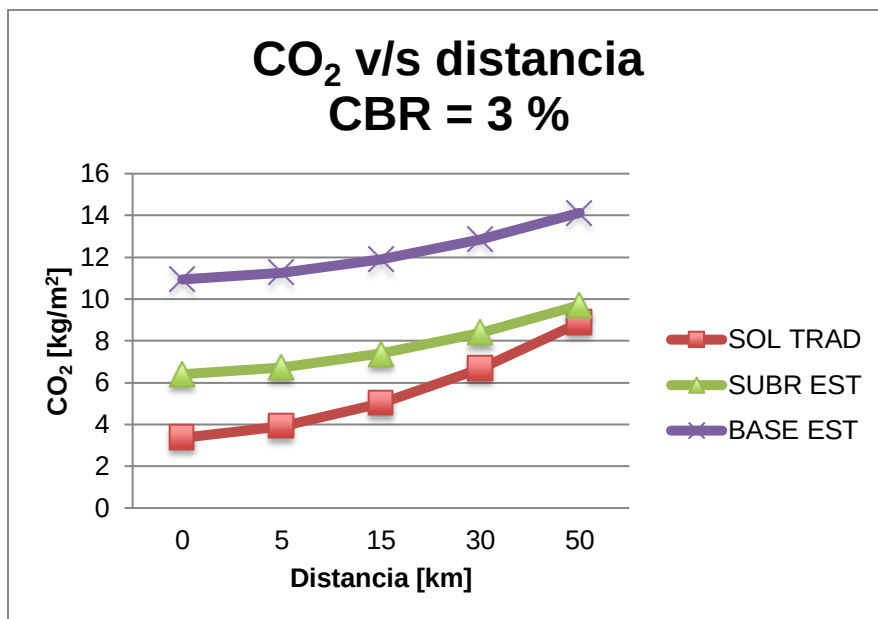


Figura 6.23 Gráfico CO₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 3 – clima lluvioso %.

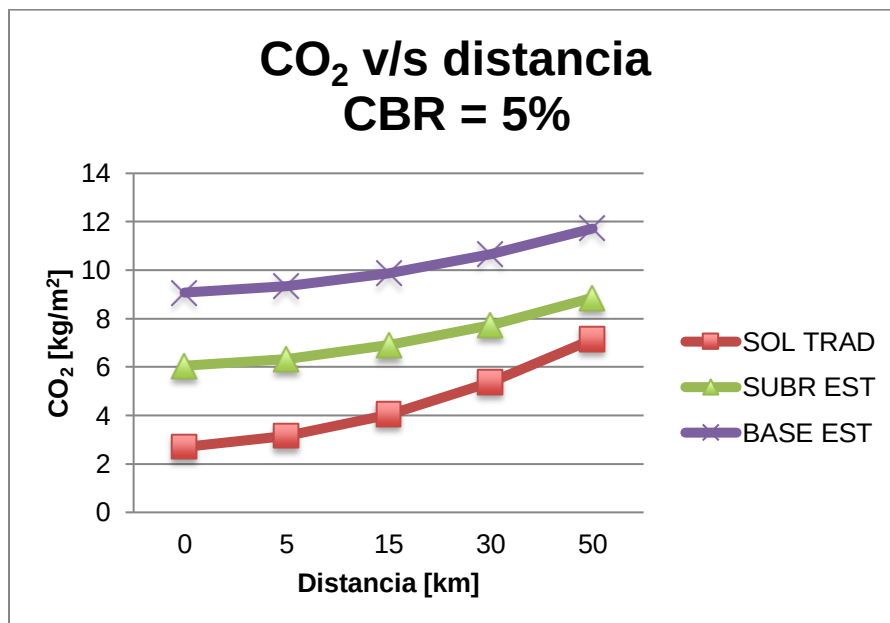


Figura 6.24 Gráfico CO₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 5% – clima lluvioso.

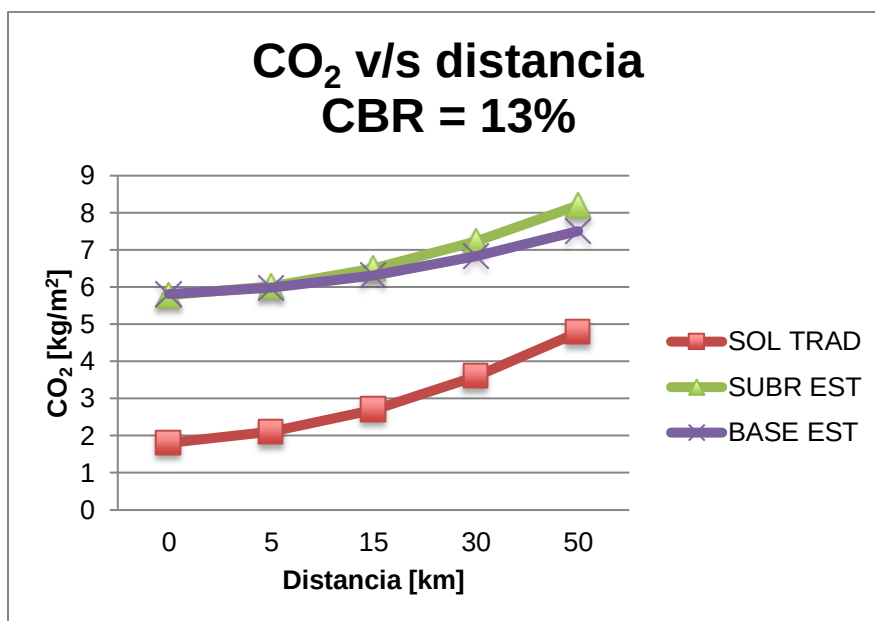


Figura 6.25 Gráfico CO₂ v/s distancia de transporte de áridos, para un CBR igual a 13% – clima lluvioso.

De las figuras anteriores se puede ver que siempre la solución tradicional presenta una menor cantidad de CO₂ emanada, y que para suelos de baja y mediana calidad, la solución con subrasante estabilizada es la segunda mejor opción; y luego para suelos de buena calidad, la solución con base estabilizada pasa a ser la mejor opción luego de la solución con base estabilizada.

6.6 CONSUMO DE ÁRIDOS DEBIDO A LOS DIFERENTES TIPOS DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES DE CAMINOS FORESTALES EN DIFERENTES ESCENARIOS EN CLIMA LLUVIOSO.

Como el material granular es producto de la explotación de un recurso natural, el cual es de carácter finito, al ser limitante en la planificación de un proyecto forestal, es de interés en el estudio cuantificar la cantidad utilizada de este por las diferentes soluciones, en los diferentes escenarios, por lo cual la tabla 6.21 resume los valores mínimos, máximos, del primer y tercer cuartil, las medianas y las medias de la cantidad de material granular requerido por las diferentes soluciones estructurales en los diferentes escenarios, los cuales se representan en un diagrama de caja y bigotes, como se muestra en la figura 6.29.

Tabla 6.21 Parámetros estadísticos de la cantidad de material granular a utilizar por las tres soluciones en los diferentes escenarios (todos los valores en m³/m² de camino forestal construido).

	Solución tradicional	Subrasante estabilizada	Base estabilizada
Cuartil 1	0,23	0,20	0,16
Mínimo	0,19	0,16	0,12
Mediana	0,28	0,21	0,20
Máximo	0,80	0,43	0,52
Cuartil 3	0,36	0,23	0,27
Media	0,33	0,23	0,23

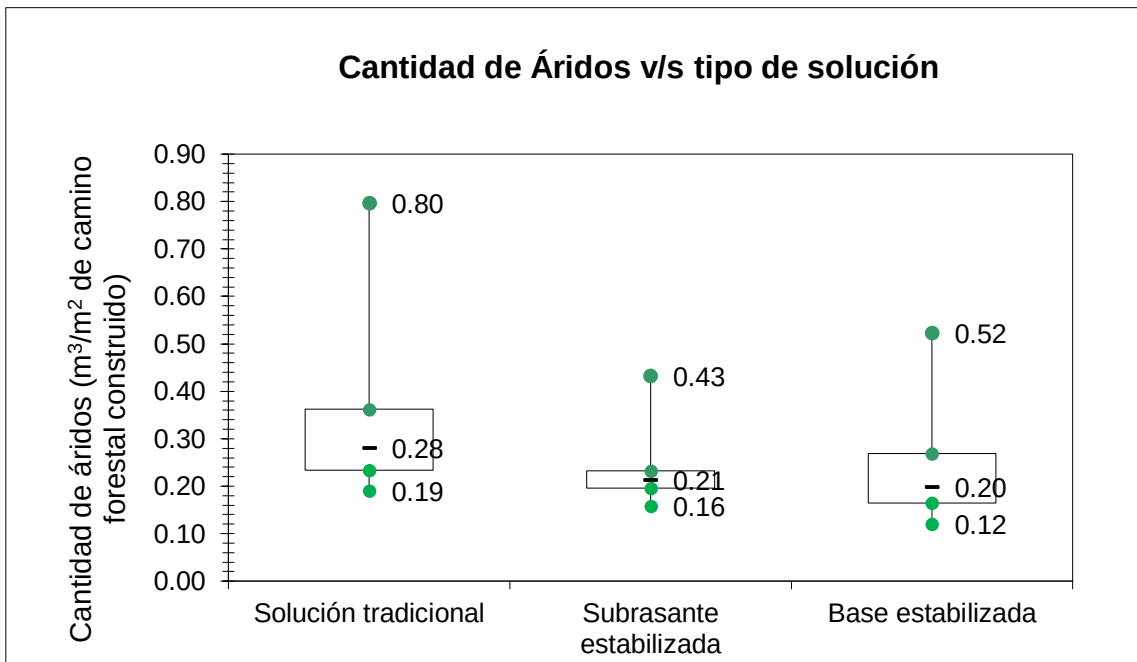


Figura 6.26 Diagrama de caja y bigotes para la cantidad de áridos requerida por las tres soluciones en los diferentes escenarios en climas lluviosos.

Del diagrama de caja y bigotes se puede ver, nuevamente, que las soluciones que utilizan estabilizadores, el consumo de áridos es menor en comparación con la solución tradicional.

La figura 6.30 muestra las soluciones más eficientes, desde el punto de vista del consumo de áridos, para las diferentes combinaciones de CBR, distancia (km), y volumen de madera transportada (m³), permitiendo identificar, robustamente, cual es la solución que requiere una menor energía por metro cuadrado de camino forestal construido para las diferentes combinaciones de CBR, distancia de transporte de material granular entre el lugar de acopio y el de construcción, y volumen de madera a transportar.

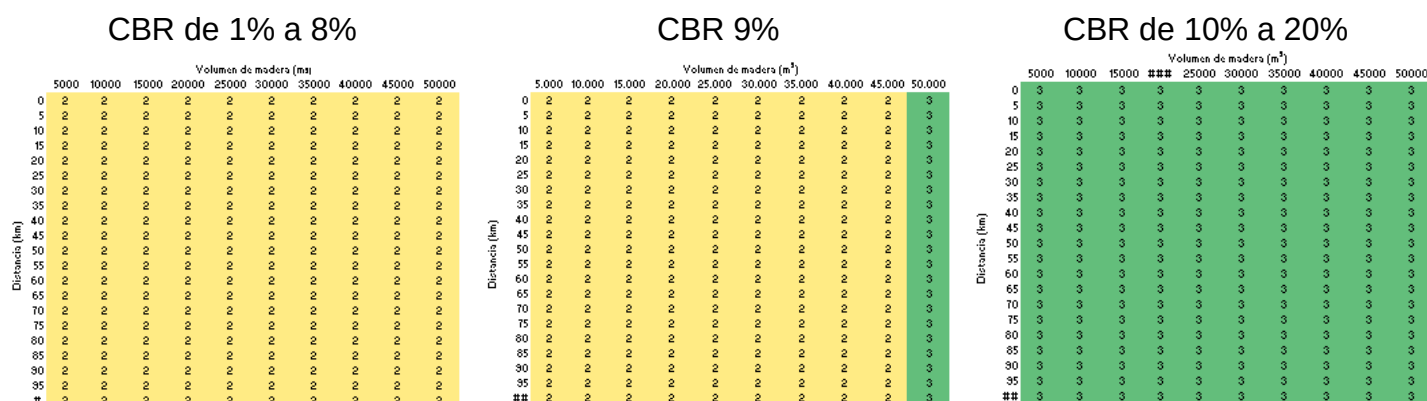


Figura 6.27 Soluciones estructurales que requieren una menor cantidad de áridos para su construcción

- 2** Representa la solución con subrasante estabilizada.
- 3** Representa la solución con la base estabilizada.

Es posible ver que la solución que requiere una menor cantidad de áridos no depende de la distancia en que estos se acopian, sino que sólo al volumen de madera a transportar. Para suelos con una capacidad de soporte inferior a 9%, siempre la solución óptima está dada por la que tiene una subrasante estabilizada, y para suelos con buena calidad, la solución que presenta un menor consumo de áridos para la construcción es la que tiene una base estabilizada.

Para analizar de manera más detallada cada caso, se comparan los resultados presentados en la Figura 6.30 con la diferencia porcentual que tienen las demás soluciones con respecto a la solución óptima. Se indica con un guion los casos que no son necesarios de comparar, porque ya corresponden a la solución de mínima energía.

Las tablas 6.22, 6.23 y 6.24 ejemplifican los casos para el suelo con CBR igual a 5%.

Tabla 6.22 Diferencia porcentual de la solución tradicional con respecto a la solución óptima, para CBR=5% - clima lluvioso.

		Volumen de madera									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	5	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	10	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	15	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	20	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	25	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	30	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	35	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	40	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	45	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	50	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	55	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	60	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	65	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	70	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	75	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	80	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	85	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	90	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	95	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%
	100	62%	61%	60%	59%	59%	58%	57%	57%	57%	56%

Tabla 6.23 Diferencia porcentual de la solución con subrasante estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% - clima lluvioso.

		Volumen de madera									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.24 Diferencia porcentual de la solución con base estabilizada con respecto a la solución óptima, para CBR=5% - clima lluvioso.

		Volumen de madera									
		5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000	40.000	45.000	50.000
Distancia (km)	0	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	5	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	10	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	15	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	20	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	25	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	30	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	35	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	40	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	45	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	50	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	55	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	60	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	65	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	70	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	75	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	80	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	85	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	90	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	95	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%
	100	20%	20%	19%	19%	18%	18%	17%	17%	17%	16%

Al notar que la solución estructural del camino forestal de explotación no es significativamente sensible al volumen de madera transportada, se realiza el análisis de sensibilidad a volumen de madera a transportar.

Se realizará el análisis para un volumen de 30.000 m³ de madera transportada, para distancias de transporte de áridos 0, 5, 15, 30 y 50 km y CBR igual a 3%, 5% y 13%, que representan suelos de baja, mediana y buena calidad en el sector forestal. Los resultados se muestran en las Figuras 6.31, 6.32 y 6.33.

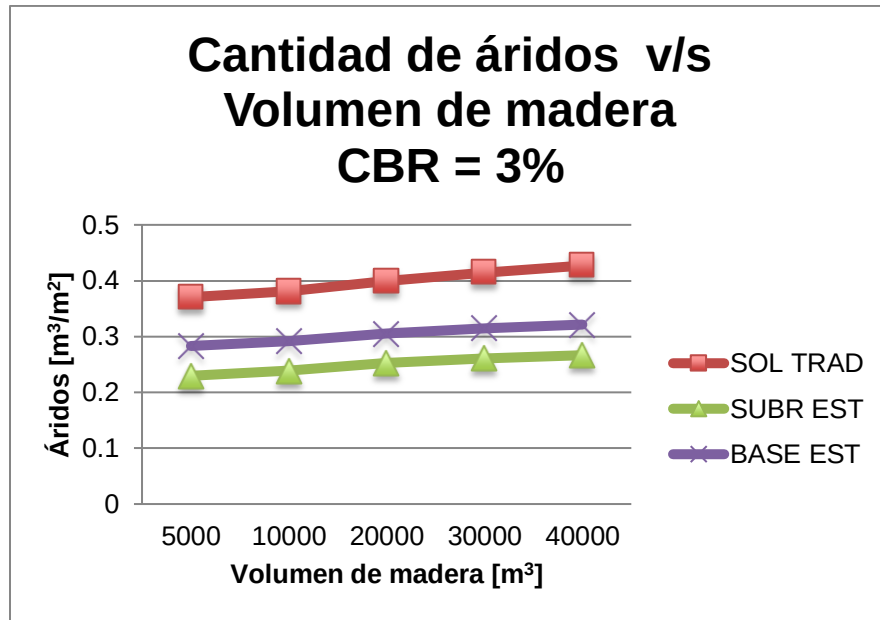


Figura 6.28 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 3% - clima lluvioso.

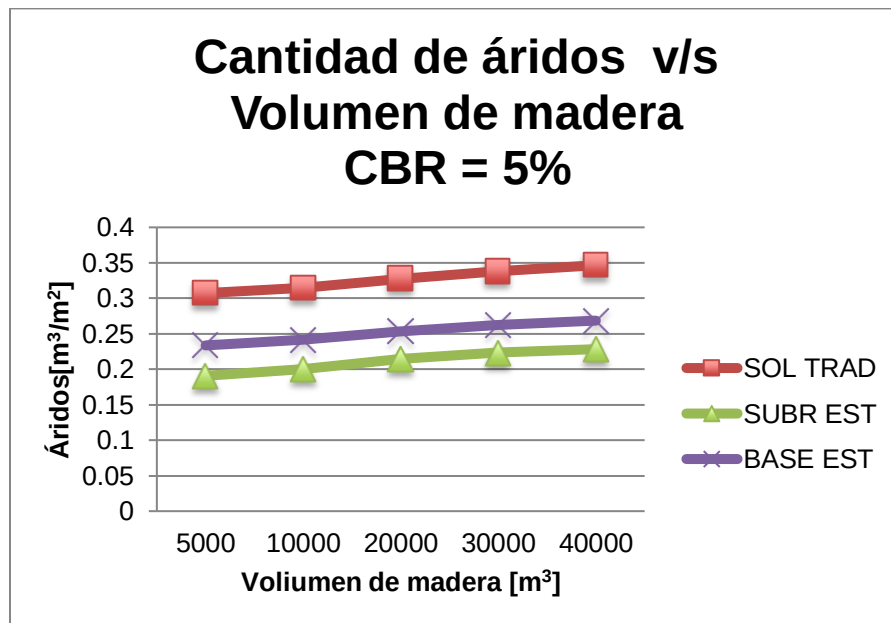


Figura 6.29 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 5% - clima lluvioso.

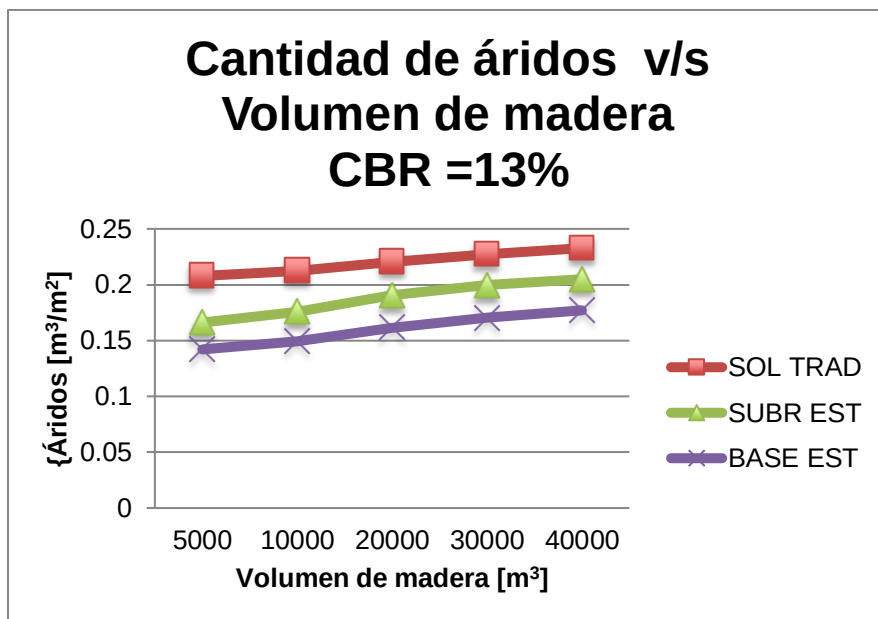


Figura 6.30 Gráfico Cantidad de áridos v/s volumen de madera transportada, para un CBR igual a 13% - clima lluvioso.

Al igual que en el caso de clima normal, se puede ver que la solución tradicional es siempre la que utiliza una mayor cantidad de áridos, comparándola con las soluciones que utilizan cemento como agente estabilizador, y que para suelos de calidad baja y media, la solución con subrasante estabilizada es la que consume una menor cantidad de áridos, pero para suelos con calidad mayor, la solución con base estabilizada pasa a ser una solución más conveniente.

7 CONCLUSIONES

Se puede concluir que:

- Es posible modelar el proceso de construcción de los caminos forestales para calcular la energía, emisión de CO₂ y utilización de material granular, basado en los valores de energía embebida en la producción de los materiales y los factores de conversión relacionados con la fuente de energía requerida para el transporte y colocación de los mismos.
- Es posible diseñar y entrenar una red neuronal que sea capaz de calcular los espesores de las capas estructurales de las diferentes soluciones de los caminos forestales en diferentes escenarios, con valores de correlación lineales superiores a 0,99, lo que demuestra un ajuste excelente entre los datos de salida de la red neuronal y los datos objetivo.
- Los valores obtenidos para energía, producción de CO₂, y cantidad de material granular necesario para cada tipo de solución estructural, no difieren más de un 10% uno del otro para los diferentes tipo de clima: normal y lluvioso, siendo este último el que presenta valores más elevados.
- La solución tradicional siempre es más conveniente para suelos con capacidad de soporte mayor al 3% y distancias de transporte de material entre el lugar de acopio y el de construcción menores a 30 km, sin importar el volumen de madera a transportar.
- La diferencia entre la solución tradicional y las soluciones estabilizadas pueden tener diferencias de 65% con respecto a la solución con subrasante estabilizada y de hasta 109% con respecto a la solución con base estabilizada, en clima normal; y de de 54% con respecto a la solución con subrasante estabilizada y de hasta 101% con respecto a la solución con base estabilizada, en clima lluvioso.
- Los caminos forestales construidos bajo el diseño de la solución tradicional tienen una menor producción de CO₂, en comparación con las soluciones que utilizan estabilizadores, siendo ecológicamente más convenientes desde el punto de vista del efecto invernadero y el calentamiento global.

- Los caminos forestales contruidos bajo el diseño de la solución tradicional tienen una menor producción de CO₂, en comparación con las soluciones que utilizan estabilizadores, siendo ecológicamente más convenientes desde el punto de vista del efecto invernadero y el calentamiento global.
- Los caminos forestales contruidos bajo el diseño de la solución tradicional tienen siempre el mayor requerimiento de áridos, en comparación con las soluciones que utilizan estabilizadores, siendo ecológicamente menos convenientes ya que es un recurso limitado, no renovable, que aumenta la erosión y contaminación de sus alrededores en el proceso de extracción.

8 REFERENCIAS

Beltrán, G. (2012). Evaluación estructural de pavimentos flexibles con métodos de inteligencia artificial y auscultación no destructiva. *Universidad Nacional Autónoma de México*.

Carmona Araos, F. A. (2010). Estimación de la Energía Consumida en la Construcción de Obra Gruesa de 3 Edificios de Altura Media en la Ciudad de Santiago de Chile.

Ceylan, H., Tutumluer, E., & Barenberg, E. J. (1998, June). Artificial neural networks as design tools in concrete airfield pavement design. In *Airport Facilities: Innovations for the Next Century. Proceedings of the 25th International Air Transportation Conference. American Society of Civil Engineers*.

Ceylan, H., Tutumluer, E., & Barenberg, E. J. (1999). Artificial neural networks for analyzing concrete airfield pavements serving the Boeing B-777 aircraft. *Transportation Research Record*, 1684(1), 110-117.

Douglas, R. A. (2016). *Low-volume road engineering: design, construction, and maintenance*. CRC Press.

Dykstra, D. P., & Heinrich, R. (1996). *Código modelo de prácticas de aprovechamiento forestal de la FAO*. Food & Agriculture Org.

FAO. 2010. The State of the World's Forests 2010 - Forest pathways to sustainable development. Rome.

Fernández, R., & Ivanna, B. (2013). Análisis comparativo de métodos de diseño de pavimentos flexibles.

Fontalba, S., & Cristina, L. (2009). Guía de Condiciones Medioambientales a Considerar para el Diseño de una Planta de Extracción y Procesamiento de Áridos. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela de Construcción Civil. Chile.

Gysling, A. J., Álvarez, V., Soto, D. A., Pardo, E. J., Poblete, P. A. (2018). Anuario Forestal 2018. *Boletín estadístico*, (163).

Gysling Caselli, J., & Soto Aguirre, D. (2018). Industria forestal primaria en Chile. Período 2006-2015.

Khazanovich, Lev & Roesler, Jeffery. (1997). DIPLOBACK: Neural-network-based backcalculation program for composite pavements. *Transportation Research Record*. 1570.

Matich, D. J. (2001). Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. *Universidad Tecnológica Nacional, México*.

Meier, R. W., & Rix, G. J. (1994). Backcalculation of flexible pavement moduli using artificial neural networks. *Transportation research record*, (1448).

NAVARRO COFRÉ, J. I. (2017). DESARROLLO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DEL ESCALONAMIENTO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Owusu-Ababio, S. (1998). Effect of neural network topology on flexible pavement cracking prediction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13(5), 349-355.

Poschen, P. (2012). *Capítulo 68 Industria forestal*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).

Quirós, R. (2015). Desarrollo de modelos estadísticos para la determinación de respuestas mecánicas críticas en pavimentos rígidos. *Trabajo final de graduación para obtención del grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca, San José de Costa Rica*.

Thenoux, G., Halles, F., Barrera, E., & Miranda, J. C. (2002). Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito. *Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile*.

Users Fernández, J. L. (2013). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales.

Vásquez, C. (2016). *Factores de equivalencia de daño en pavimentos flexibles: análisis para condiciones típicas de Argentina* (Doctoral dissertation, Tesis de maestría). Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina)