

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**MODELAMIENTO Y PROGRAMACIÓN DE HERRAMIENTA  
PARA OPTIMIZACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE FLOTAS  
DE MAQUINARIA DE COMPACTACIÓN MASIVA EN OBRAS  
CIVILES**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR:**

**FINLEY FERMÍN POZO SEDANO**

**ASESOR:**

**Mg. JUAN CARLOS UBILLUS CALMET**

**LIMA – PERÚ**

**2021**

© 2021, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o parte, con fines estrictamente académicos”.**

Finley Fermín Pozo Sedano

[fpozosedano@gmail.com](mailto:fpozosedano@gmail.com)

Telf.: 980-267-817

***Dedicatoria:***

*Dedico esta tesis a mis padres, quienes me apoyaron y hasta la luz de hoy siguen alentando a cumplir mis metas y la de mis hermanos.*

***Agradecimientos:***

*Dar un agradecimiento especial al Ing. Juan Carlos Ubillus, por su gran disposición y desinteresado apoyo en la realización de este trabajo. De igual manera, agradezco a mis padres y hermanos por brindarme su apoyo y soporte desde siempre.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
<b>PRÓLOGO</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>15</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b> .....	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>19</b>
1.1. GENERALIDADES.....	19
1.2. PROBLEMÁTICA.....	20
1.3. OBJETIVOS.....	22
1.3.1. Objetivo General.....	22
1.3.2. Objetivos Específicos.....	22
1.4. HIPÓTESIS.....	23
1.4.1. Hipótesis General .....	23
1.4.2. Hipótesis Específicas .....	23
<b>CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
2.1. INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES .....	24
2.1.1. Metodología de la Investigación de Operaciones .....	24
2.1.2. Formulación del Modelo Matemático.....	24
2.1.2.1. Variables de Decisión.....	25
2.1.2.2. Función Objetivo .....	25
2.1.2.3. Restricciones.....	25
2.1.3. Modelo de Programación Matemática.....	25
2.1.4. Programación Lineal .....	26
2.1.5. Formulación del Problema de Programación Lineal .....	26
2.1.6. Métodos de Solución para los Problemas de Programación Lineal .....	27
2.1.7. Otros Modelos de Programación.....	28
2.1.7.1. Programación No Lineal.....	28
2.1.7.2. Programación Entera .....	29
2.1.7.3. Programación Dinámica .....	30
2.2. MECÁNICA DE SUELOS.....	30

2.2.1.	Origen de los Suelos.....	31
2.2.2.	Tipos de Suelo .....	32
	2.2.2.1. <i>Suelos Cohesivos y No Cohesivos</i> .....	33
2.2.3.	Prueba/Ensayo Proctor .....	34
	2.2.3.1. <i>Prueba de Proctor Estándar</i> .....	35
	2.2.3.2. <i>Prueba de Proctor Modificado</i> .....	37
	2.2.3.3. <i>Porcentaje de Compactación en Campo</i> .....	39
2.2.4.	Propiedades de Suelo.....	41
2.2.5.	Límites del Suelo .....	42
	2.2.5.1. <i>Límite Líquido LL</i> .....	42
	2.2.5.2. <i>Límite Plástico PL</i> .....	43
	2.2.5.3. <i>Índice de Plasticidad PI</i> .....	43
2.2.6.	Sistema de Clasificación de Suelos .....	44
	2.2.6.1. <i>Sistema de Clasificación AASHTO</i> .....	45
	2.2.6.2. <i>Sistema Unificado de Clasificación de Suelos</i> .....	45
2.3.	MAQUINARIAS DE MOVIMIENTO DE TIERRAS .....	46
2.3.1.	Maquinarias de Excavación .....	47
	2.3.1.1. <i>Tractor de Orugas</i> .....	47
	2.3.1.2. <i>Cargador Frontal</i> .....	48
	2.3.1.3. <i>Excavadora Hidráulica sobre Orugas</i> .....	50
2.3.2.	Maquinarias de Transporte .....	51
	2.3.2.1. <i>Camión Volquete</i> .....	51
2.3.3.	Maquinarias de Conformación .....	52
	2.3.3.1. <i>Motoniveladora</i> .....	52
2.3.4.	Maquinarias de Compactación.....	53
	2.3.4.1. <i>Rodillo Liso Vibratorio</i> .....	53
2.4.	FÍSICA DE LA COMPACTACIÓN .....	54
2.4.1.	Introducción .....	54
2.4.2.	Factores Influyentes en la Compactación Vibratoria.....	54
	2.4.2.1. <i>Características Relacionadas con el Material y la Obra</i> ..	54
	2.4.2.2. <i>Características Relacionadas con las Especificaciones</i> <i>Técnicas del Proyecto</i> .....	56
	2.4.2.3. <i>Características Relacionadas con la Maquinaria</i> .....	58
2.4.3.	Dinámica de la Compactación Vibratoria.....	60
	2.4.3.1. <i>Tipos de Fuerzas de Compactación</i> .....	60

2.4.3.2.	Compactación Vibratoria .....	64
2.4.4.	Profundidad de la Compactación .....	67
2.4.5.	Control de Calidad de la Compactación .....	69
2.4.5.1	Prueba del Densímetro Nuclear .....	69
2.5.	PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VÍAL .....	71
2.5.1.	Proyectos Civiles .....	71
2.5.2.	Infraestructura Vial.....	71
2.6.	COSTO Y PRODUCCIÓN DE EQUIPOS DE COMPACTACIÓN .....	72
2.6.1.	Costo de Maquinaria de Compactación.....	72
2.6.1.1.	Costos de posesión o gastos fijos .....	73
2.6.1.2.	Costos de operación o gastos variables .....	75
2.6.2.	Producción de Maquinaria de Compactación .....	78
2.7.	GESTIÓN DEL VALOR GANADO.....	80
<b>CAPÍTULO III: MODELAMIENTO MATEMÁTICO .....</b>		<b>85</b>
3.1.	INTRODUCCIÓN .....	85
3.2.	MODELO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN .....	85
3.2.1.	Respecto al Costo de los Equipos de Compactación .....	87
3.2.2.	Respecto a la Productividad de los Equipos de Compactación .	87
3.2.3.	Respecto a las Características Geométricas del Frente de Trabajo .....	88
3.2.4.	Modelo Final .....	90
3.3.	MÉTODO SIMPLEX.....	93
3.4.	RESUMEN .....	95
<b>CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL SOFTWARE.....</b>		<b>96</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN .....	96
4.2.	SINOPSIS DEL PROGRAMA .....	96
4.2.1.	Entorno de Desarrollo Integrado .....	97
4.2.1.1.	Android Studio.....	97
4.2.2.	Lenguajes de Programación a Emplear .....	98
4.2.2.1.	Java .....	98
4.2.2.2.	PHP .....	99
4.2.3.	Servicio Web.....	100
4.2.4.	Esquema Del Programa.....	101
4.3.	PROGRAMACIÓN DEL MODELO .....	104

4.3.1.	Diagrama de Flujo del Programa.....	104
4.3.2.	Estructura del Programa para el Problema de Dimensionamiento .....	105
4.4.	DATOS DE ENTRADA DEL SOFTWARE .....	110
4.4.1.	Datos de Entrada de Equipos .....	111
4.4.2.	Datos de Entrada de Proyectos .....	112
4.5.	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	114
4.6.	DATOS DE SALIDA DEL SOFTWARE .....	117
4.6.1.	Cantidad y Tipo de Equipos de Compactación.....	117
4.6.2.	Función Objetivo Optimizado .....	117
4.7.	VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE.....	118
4.8.	RESUMEN .....	121
<b>CAPÍTULO V: APLICACIÓN DEL MODELO EN LA OBRA LÍNEA AMARILLA</b> .....		<b>122</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN .....	122
5.2.	PROYECTO LÍNEA AMARILLA .....	122
5.2.1.	Actividades Incidentes en Costo .....	123
5.2.1.1.	<i>Clasificación de Actividades</i> .....	123
5.2.1.2.	<i>Elección de la Partida a Optimizar</i> .....	124
5.2.2.	Situación Inicial del Proyecto .....	129
5.2.2.1.	<i>Dimensionamiento Convencional de Maquinaria</i> .....	130
5.3.	CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO.....	130
5.3.1.	Viaducto 4.2.....	130
5.3.1.1.	<i>Lugar y Plazo de Ejecución</i> .....	130
5.3.1.2.	<i>Metrado a Ejecutar</i> .....	132
5.3.1.3.	<i>Condiciones Geotécnicas</i> .....	132
5.3.1.4.	<i>Condiciones de Espacio</i> .....	132
5.3.1.5.	<i>Productividad en el Proceso Constructivo</i> .....	133
5.3.2.	Viaducto 6.1 .....	134
5.3.2.1.	<i>Lugar y Plazo de Ejecución</i> .....	134
5.3.2.2.	<i>Metrado a Ejecutar</i> .....	135
5.3.2.3.	<i>Condiciones Geotécnicas</i> .....	136
5.3.2.4.	<i>Condiciones de Espacio</i> .....	136
5.3.2.5.	<i>Productividad en el Proceso Constructivo</i> .....	137
5.4.	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE COMPACTACIÓN.....	138

5.4.1.	Dimensiones de los Equipos .....	139
5.4.2.	Objetivo Geotécnico.....	139
5.4.3.	Operatividad .....	140
5.4.4.	Costo .....	140
5.5.	APLICACIÓN DEL SOFTWARE .....	144
5.5.1.	Viaducto 4.2.....	144
5.5.1.1.	<i>Datos de Entrada del Software.....</i>	<i>144</i>
5.5.1.2.	<i>Proceso de Ejecución del Software .....</i>	<i>145</i>
5.5.1.3.	<i>Datos de Salida del Software .....</i>	<i>146</i>
5.5.2.	Viaducto 6.1 .....	148
5.5.2.1.	<i>Datos de Entrada del Software.....</i>	<i>148</i>
5.5.2.2.	<i>Proceso de Ejecución del Software .....</i>	<i>150</i>
5.5.2.3.	<i>Datos de Salida del Software .....</i>	<i>154</i>
5.6.	RESUMEN.....	156
<b>CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>		<b>157</b>
6.1.	INTRODUCCIÓN .....	157
6.2.	VIADUCTO 4.2 .....	158
6.2.1.	Ejecución en el Frente de Trabajo.....	158
6.2.2.	Gestión del Valor Ganado.....	159
6.2.3.	Proyección de la Obra sin Optimizar .....	161
6.2.4.	Determinación de Ahorros.....	162
6.2.4.1.	<i>A Nivel de Plazo.....</i>	<i>162</i>
6.2.4.2.	<i>A Nivel de Costo .....</i>	<i>163</i>
6.3.	VIADUCTO 6.1 .....	166
6.3.1.	Ejecución en el Frente de Trabajo.....	166
6.3.2.	Gestión del Valor Ganado.....	169
6.3.3.	Proyección de la Obra sin Optimizar .....	173
6.3.4.	Determinación de Ahorros.....	174
6.3.4.1.	<i>A nivel de Plazo .....</i>	<i>174</i>
6.3.4.2.	<i>A Nivel de Costo .....</i>	<i>176</i>
6.4.	RESUMEN.....	182
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>183</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>185</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>187</b>

**ANEXOS ..... 189**

## RESUMEN

El tema de investigación consiste en desarrollar una herramienta capaz de optimizar los costos incurridos al momento de determinar los equipos a usar en los trabajos de compactación de suelos. Por ello, se estudia el proceso de producción con el objetivo de encontrar la mejor opción y, para lograrlo, se realiza la investigación de operaciones del problema, posteriormente se realiza el modelamiento y parametrización a través métodos analíticos con el fin de encontrar una solución real y factible al problema formulado.

Para ello se estudian los componentes que influyen en el trabajo de ejecución del relleno controlado tales como las características del proyecto -especificaciones técnicas y de material-, así como también las características de los equipos disponibles para la compactación -características geométricas y productividad-, tomando en cuenta siempre la zona en donde se va a construir.

El problema de optimización de recursos se convierte en un problema de programación lineal, construyendo las restricciones correspondientes y formulando la función objetivo, buscando el minimizar los costos de alquiler de equipos y, en consecuencia, obtener la flota más eficiente con la que se debe contar para ejecutar el trabajo de compactación. Ello se soluciona a través del método simplex, en su variante del método de las dos fases. El algoritmo devuelve la solución de la función objetivo y esta, nos indica la cantidad y tipo de equipo a utilizar en el proyecto. Todo este proceso se materializa a través de la programación de un software, una aplicación llamada *OptimiAPP*, desarrollada para teléfonos móviles. Esta aplicación requiere del ingreso de data para su procesamiento y muestra de datos.

El software desarrollado se implementó en el proyecto Línea Amarilla, específicamente en los frentes donde se ejecutaron los muros de tierra armada de los viaductos 6.1 y 4.2, dando como resultado la flota óptima y generando ahorros en costo y plazo.

El motivo principal de nuestro estudio es analizar por qué ocurren bajos niveles de productividad en obras en donde las partidas de movimiento de tierras son las más incidentes en costo y plazo. Poder entender el proceso y luego mejorarlo a través de métodos analíticos nos llevará a actualizar la forma de ejecución de este tipo de trabajos fundamentales para el desarrollo de proyectos civiles y mineros.

## ABSTRACT

This research topic consist of developing a tool (software) capable of optimizing the costs incurred when a contractor company needs to determining the equipment to be used in soil compaction work. For this reason, the production process is studied in order to find the best option and, to achieve this, the Operations Investigation of the problem is carried out. Subsequently, modeling and parameterization is carried out through analytical mehods in order to find a real and feasible solution to our formulated problem.

For this, the components that influence the work of executing the controlled fill are studied, such as the characteristics of the projects -technical and material specifications-, as well as the characteristics of the available equipment for compaction -geometric characteristics and productivity-, taking into account the area where it is going to be built.

The resource optimization problem becomes a linear programming problem, constructing the corresponding restrictions and formulating the objective function, seeking to minimize equipment rental costs and, consequently, the most efficient fleet that must be counted on for run the compaction work. This is solved through the simplex method, in its variant of the two-phase method. The algorithm returns the solution of the objective function and this indicates the amount and type of equipment to be used in the project. All this process is materialized through the programming of a software, an application called *OptimiAPP*, developed for mobile phones. This application requires data entry for data processing and display.

The software developed was implemented in the Linea Amarilla project, specifically on the fronts where the reinforced earth walls of viaducts 6.1 and 4.2 were executed, resulting in the optimal fleet and generating savings in cost and time.

The main reason for our study is to analyze why low levels of productivity occur in works where earthmoving items are the most incidents in terms of cost and time. Being able to understand the process and then improve it through analytical methods will lead us to update the form of execution of this type of fundamental work for the development of civil and mining projects.

## PRÓLOGO

La Universidad Nacional de Ingeniería a lo largo de toda su historia, viene formando profesionales que demuestran una sólida competencia técnica y de innovación, capaces de asumir grandes responsabilidades respetando los principios éticos de la profesión y actualizando sus conocimientos constantemente para afrontar los cambios que surgen dentro de la Ingeniería Civil.

Por consiguiente, se hace llegar la presente Tesis titulada “MODELAMIENTO Y PROGRAMACIÓN DE HERRAMIENTA PARA OPTIMIZACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE FLOTAS DE MAQUINARIA DE COMPACTACIÓN MASIVA EN OBRAS CIVILES”, basado en la experiencia profesional y la investigación efectuada sobre el tema por uno de nuestros egresados, Finley Fermín Pozo Sedano.

El motivo de la realización de la presente tesis es dar a conocer el desarrollo de una metodología y software aplicativo, que permite optimizar la productividad de maquinaria pesada de construcción, asimismo la adecuada selección técnica de la misma y lograr ahorros económicos en los proyectos.

Al respecto, no quiero dejar de resaltar el esfuerzo de nuestro egresado con este trabajo de investigación para dejar lecciones aprendidas para proyectos similares y su contribución para seguir innovando en busca de mejorar las operaciones, los procesos y la productividad.

Mg. Ing. Juan Carlos Ubillus Calmet  
ASESOR

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Proceso de Formación de los Suelos.....	31
Figura 2.2. Tipos de Suelo .....	32
Figura 2.3. Distribución del tamaño de partículas .....	32
Figura 2.4. Resultados de la prueba de compactación Proctor Estándar para arcilla limosa.....	36
Figura 2.5. Efectos del incremento de la energía de compactación en una arcilla limosa.....	38
Figura 2.6. Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificada para un limo arcilloso. ....	38
Figura 2.7. Condición de compactación más económica. ....	40
Figura 2.8. Aparato usado para probar el límite líquido simple.....	42
Figura 2.9. Índice de plasticidad PI. ....	43
Figura 2.10. Índice de plasticidad (en %) vs. Límite líquido (en %). ....	44
Figura 2.11. Tractor Caterpillar D6T en proceso de corte y empuje frontal. ....	47
Figura 2.12. Gráfica de producción de las hojas topadoras para tractor sobre oruga. ....	48
Figura 2.13. Cargador Frontal Caterpillar 966H. ....	49
Figura 2.14. Gráfica de tiempo de viaje del cargador frontal Caterpillar 966H - vacío.....	49
Figura 2.15. Gráfica de tiempo de viaje del cargador frontal Caterpillar 966H - cargado. ....	50
Figura 2.16. Excavadora sobre orugas Caterpillar 336DL en proceso de corte de material. ....	50
Figura 2.17. Volquete con capacidad de tolva de 17 m <sup>3</sup> en proceso de carga... 51	
Figura 2.18. Motoniveladora John Deere (similar al CAT 140K) en proceso perfilado de subrasante. ....	52
Figura 2.19. Rodillo liso vibratorio BOMAG BW177 DH-5 (similar al CAT CS64B) en proceso de compactación del afirmado.....	53
Figura 2.20. Número de pasadas N vs. Densidad máxima seca $\gamma_d$ para una arcilla limosa.....	57
Figura 2.21. Diferencia entre una pasada y un ciclo de compactación.....	58
Figura 2.22. Rodillos de tambor liso (izquierda) y tambor con pisones (derecha). ....	58
Figura 2.23. Compactador de Pisón de Cuña. ....	59

Figura 2.24. Compactador Pata de Cabra.....	59
Figura 2.25. Compactación por presión estática. ....	61
Figura 2.26. Carga lineal estática de un rodillo compactador.....	61
Figura 2.27. Compactación por manipulación. ....	62
Figura 2.28. Compactación por impacto. ....	63
Figura 2.29. Compactación por vibración.....	63
Figura 2.30. Gráfica altura vs. Dirección con amplitud para frecuencia baja y alta. .....	64
Figura 2.31. Gráfica altura vs. Dirección para frecuencia baja y alta.....	65
Figura 2.32. Resonancia trabajando en contra del esfuerzo de compactación (izquierda) y resonancia trabajando en conjunto llamado convergencia armónica (derecha).....	65
Figura 2.33. Diagrama de cuerpo libre de la pesa excéntrica mostrando la fuerza centrípeta. ....	66
Figura 2.34. Densímetro nuclear para medición por transmisión directa. ....	70
Figura 2.35. Curva “S” del Valor Ganado EV, Valor Planificado PV y Costos Reales AC. ....	84
Figura 3.1 Representación del modelo del problema de optimización de maquinarias de compactación. ....	86
Figura 3.2. Distancia Lateral (DL) y Distancia Frontal (DF) del equipo de compactación. ....	89
Figura 4.1. Ventana Principal de Android Studio.....	97
Figura 4.2. Ventana principal de PHPSimplex, programa basado en el lenguaje PHP en la web.....	100
Figura 4.3. Esquematación del Servicio Web. ....	100
Figura 4.4. Esquema de flujo y procesamiento de información del programa o aplicativo. ....	103
Figura 4.5. Diagrama de flujo del problema de optimización de equipos de compactación. ....	104
Figura 4.6. Estructura de programación del aplicativo <i>OptimiAPP</i> desde el IDE Android Studio.....	105
Figura 4.7. Interfaz de inicio de la aplicación <i>OptimiAPP</i> y barra de menú desplegable.....	110
Figura 4.8. Datos de entrada de Equipos en la aplicación. ....	111

Figura 4.9. Datos de entrada ingresados de los modelos ofertados CS54 B, CS56 B y CS64 B.....	112
Figura 4.10. Datos de entrada de Proyectos en la aplicación.....	113
Figura 4.11. Datos de entrada del “Proyecto ABC” en la aplicación y pantalla de detalle.....	113
Figura 4.12. Selección de modelos disponibles del proyecto.....	114
Figura 4.13. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción $r_i$ .....	115
Figura 4.14. Resumen de la operación en <i>OptimiAPP</i> , con la función objetivo y las restricciones.....	116
Figura 4.15. Flota de equipos de compactación optimizada por <i>OptimiAPP</i> . ...	117
Figura 4.16. Valor de la función objetivo optimizada por <i>OptimiAPP</i> .....	118
Figura 4.17. Problema de optimización de equipos de compactación Proyecto ABC en el software Ms Excel – SOLVER. ....	119
Figura 4.18. Función objetivo y restricciones ingresadas en el software Ms Excel – SOLVER.....	119
Figura 4.19. Solución del problema de optimización de equipos de compactación Proyecto ABC en Ms Excel – SOLVER. ....	120
Figura 5.1. Mapa del Proyecto Línea Amarilla. ....	122
Figura 5.2. Diagrama de Pareto para el Viaducto 4.2. ....	125
Figura 5.3. Diagrama de Pareto para el viaducto 6.1. ....	128
Figura 5.4. Avance planeado vs. avance real de relleno para el Viaducto 4.2..	129
Figura 5.5. Ubicación del viaducto 4.2 del Proyecto Línea Amarilla. ....	131
Figura 5.6. Vista de perfil del viaducto 4.2 del proyecto. ....	132
Figura 5.7. Área de proyecto del viaducto 4.2.....	133
Figura 5.8. Ubicación del Viaducto 6.1 del Proyecto Línea Amarilla.....	134
Figura 5.9. Vista de perfil del sector 01 del viaducto 6.1. ....	135
Figura 5.10. Vista de perfil del sector 02 del viaducto 6.1. ....	135
Figura 5.11. Área de proyecto del sector 01 del viaducto 6.1.....	136
Figura 5.12. Área de proyecto del sector 02 del viaducto 6.1.....	137
Figura 5.13. Principales proveedores de equipos del proyecto Línea Amarilla.	143
Figura 5.14. Datos de entrada del viaducto 4.2. en la aplicación y pantalla de detalle.....	145
Figura 5.15. Selección de modelos disponibles para el viaducto 4.2. ....	145

Figura 5.16. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción para el viaducto 4.2. ....	146
Figura 5.17. Datos de salida de la aplicación para el viaducto 4.2. ....	147
Figura 5.18. Datos de entrada del viaducto 6.1 – sector 01 en la aplicación y pantalla de detalle. ....	149
Figura 5.19. Datos de entrada del viaducto 6.1 – sector 02 en la aplicación y pantalla de detalle. ....	150
Figura 5.20. Selección de modelos disponibles para el viaducto 6.1 – sector 01. ....	151
Figura 5.21. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción para el viaducto 6.1 – sector 01. ....	151
Figura 5.22. Selección de modelos disponibles para el viaducto 6.1 – sector 02. ....	152
Figura 5.23. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción para el viaducto 6.1 – sector 02.....	153
Figura 5.24. Datos de salida de la aplicación para el viaducto 6.1 – sector 01.	154
Figura 5.25. Datos de salida de la aplicación para el viaducto 6.1 – sector 02.	155
Figura 6.1. Avance semanal del relleno controlado del viaducto 4.2. ....	159
Figura 6.2. Curva “S” del costo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 4.2. ....	161
Figura 6.3. Vista aérea del viaducto 4.2 antes de iniciar con la optimización en el frente. ....	164
Figura 6.4. Proceso de compactación inicial del material granular en el viaducto 4.2 con el rodillo HAMM 3410. ....	164
Figura 6.5. Proceso de compactación realizado con el rodillo HAMM 3410 luego de alcanzar el nivel de compactación de lo ejecutado antes de la optimización. ....	165
Figura 6.6. Entrega final del muro de tierra armada de viaducto 4.2. ....	165
Figura 6.7. Avance semanal del relleno controlado del viaducto 6.1, sector 01. ....	167
Figura 6.8. Avance semanal del relleno controlado del viaducto 6.1, sector 02. ....	169
Figura 6.9. Curva “S” del costo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.....	171

Figura 6.10. Curva “S” del costo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.....	173
Figura 6.11. Lugar de ejecución donde se extenderá todo muro de tierra armada del viaducto 6.1 al margen izquierdo del río Rímac. ....	178
Figura 6.12. Zona liberada para dar inicio a los trabajos de relleno controlado en el viaducto 6.1, sectores 01 y 02. ....	178
Figura 6.13. Rodillos compactadores HAMM 3410 y BOMAG BW 211 compactando frente a frente en el sector 01 del muro de tierra armada del viaducto 6.1. ....	179
Figura 6.14. Rodillos compactadores HAMM 3410 y BOMAG BW 211 compactando de manera paralela en el sector 01 del muro de tierra armada del viaducto 6.1. ....	179
Figura 6.15. Rodillo BOMAG BW 211 compactando en el sector 02 del muro de tierra armada del viaducto 6.1. ....	180
Figura 6.16. Rodillo BOMAG BW 211 compactando en el sector 02 del muro de tierra armada del viaducto 6.1. ....	180
Figura 6.17. Entrega final del muro de tierra armada del viaducto 6.1. ....	181
Figura 6.18. Entrega final del muro de tierra armada del viaducto 6.1. ....	181

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de los suelos cohesivos y no cohesivos. ....	34
Tabla 2.2. Cuadro comparativo Proctor Estándar vs. Proctor Modificado.....	39
Tabla 2.3. Clasificación de suelos para subrasante AASHTO.....	45
Tabla 2.4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	46
Tabla 2.5. Modelos de excavadoras sobre orugas.....	51
Tabla 2.6. Modelos de motoniveladoras. ....	53
Tabla 2.7. Uniformidad del Suelo.....	55
Tabla 2.8. Características de los rodillos de compactación.....	60
Tabla 2.9. Carga lineal estática por peso de equipo compactador. ....	62
Tabla 2.10. Tabla de aplicación de equipo compactador por tipo de suelo. ....	67
Tabla 2.11. Número de pasadas del equipo por tipo de suelo a compactar. ....	68
Tabla 2.12. Valores para los factores Ka. ....	74
Tabla 2.13. Porcentajes de mantenimiento y reparación.....	76
Tabla 2.14. Consumo de combustible, lubricantes y grasas, según tipo de equipo compactador.....	76
Tabla 2.15. Vida útil de neumáticos. ....	77
Tabla 2.16. Factor de eficiencia de trabajo E.....	79
Tabla 2.17. Interpretación de las variaciones e índices de costo y cronograma. ....	83
Tabla 4.1. Versiones de Java.....	99
Tabla 5.1. Determinación de partidas a considerar en ambos frentes en la clasificación Pareto.....	124
Tabla 5.2. Clasificación de partidas para el viaducto 4.2.....	125
Tabla 5.3. Costo unitario por partida del relleno para el viaducto 4.2.....	126
Tabla 5.4. Clasificación de partidas para el viaducto 6.1.....	127
Tabla 5.5. Costo unitario por partida del relleno para el viaducto 6.1.....	128
Tabla 5.6. Detalle de dimensionamiento convencional de maquinaria de compactación.....	130
Tabla 5.7. Conformación del Viaducto 4.2. ....	131
Tabla 5.8. Conformación del Viaducto 6.1. ....	134
Tabla 5.9. Determinación del área de trabajo del equipo compactador.....	139
Tabla 6.1. Detalle de los conceptos utilizados para el análisis de resultados... ..	157
Tabla 6.2. Avance semanal del relleno controlado en el viaducto 4.2. ....	158
Tabla 6.3. Desempeño de las horas máquina del equipo en la ejecución del relleno controlado en el viaducto 4.2.....	159

Tabla 6.4. Cálculo del valor planeado PV, valor ganado EV y costo real AC de la actividad de relleno controlado en el viaducto 4.2.....	160
Tabla 6.5. Costo total de la actividad de compactación sin optimizar para el viaducto 4.2. ....	161
Tabla 6.6. Avance semanal del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01. ....	166
Tabla 6.7. Desempeño de las horas máquina del equipo en la ejecución del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01. ....	167
Tabla 6.8. Avance semanal del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02. ....	168
Tabla 6.9. Desempeño de las horas máquina del equipo en la ejecución del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02. ....	169
Tabla 6.10. Cálculo del valor planeado PV, valor ganado EV y costo real AC de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.....	170
Tabla 6.11. Cálculo del valor planeado PV, valor ganado EV y costo real AC de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.....	172
Tabla 6.12. Costo total de la actividad de compactación sin optimizar para el viaducto 6.1, sector 01.....	174
Tabla 6.13. Costo total de la actividad de compactación sin optimizar para el viaducto 6.1, sector 02.....	174

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

PBI	: Producto Bruto Interno
ISO	: Organización Internacional de Normalización
ASTM	: Sociedad Americana de Ensayo de Materiales
NTP	: Norma Técnica Peruana
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
MVCS	: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
$\gamma$	: Peso específico húmedo de compactación
$W$	: Peso del suelo compactado
$\gamma_d$	: Peso específico seco
$\gamma_{zav}$	: Peso específico con cero vacíos de aire
$G_s$	: Densidad de sólidos del suelo
$R(\%)$	: Porcentaje de compactación de campo
LL	: Límite Líquido
PL	: Límite Plástico
PI	: Índice de Plasticidad
AASHTO	: Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte
SUCS	: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
HP	: Caballo de fuerza
$C_U$	: Coeficiente de Uniformidad
MAC	: Mezcla Asfáltica en Caliente
PMBOK	: Guía de Fundamentos para la Gestión de Proyectos
CM	: Costo total de tarifa de maquinaria
D	: Depreciación
I	: Interés de capital invertido
i	: Tasa de interés anual vigente para el tipo de moneda a utilizar
S,A	: Costo por seguro y Almacenaje de maquinaria
MR	: Gastos de Mantenimiento y Reparación
Co	: Combustibles
L	: Lubricantes
F	: Filtros
OP	: Costo de operador de maquinaria
$r_c$	: Velocidad de compactación

W	: Ancho efectivo de compactación
V	: Velocidad de operación
e	: Espesor de la capa de compactación
E	: Factor de eficiencia de trabajo
N	: Número de pasadas
H	: Factor de altura
EVM	: Gestión del Valor Ganado
PV	: Valor Planificado
EV	: Valor Ganado
AC	: Costo Real
SV	: Variación del Cronograma
SPI	: Índice de Desempeño del Cronograma
CV	: Variación del Costo
CPI	: Índice de Desempeño del Costo
BAC	: Presupuesto hasta la Conclusión
EAC	: Estimado a la Conclusión
VAC	: Variación a la Conclusión
$x_i$	: Maquinaria Ofertada
$a_i$	: Área de trabajo del equipo
$c_i$	: Costo unitario de alquiler de equipo
S	: Tipo de suelo
$mcc$	: Volumen a compactar
A	: Área de proyecto
T	: Tiempo de trabajo o plazo de ejecución
he	: Horas efectivas de trabajo por jornada
J	: Número de jornadas por día
R	: Demanda de producción por hora
IDE	: Entorno de Desarrollo Integrado
JDK	: Kit de Desarrollo de Java
HTML	: Lenguaje de Marcado de Hipertexto
UDDI	: Directorio de Interfaces del Servicio Web
WSDL	: Lenguaje de Descripción de los Servicios Web
SOAP	: Protocolo de Acceso a Objetos
Lamsac	: Línea Amarilla S. A. C.
USD	: Dólar estadounidense

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

La industria de la construcción en el Perú viene recuperando su incidencia en la contribución del PBI, en el 2019 el porcentaje del rubro en el primer trimestre fue del 1.8% con mayores proyecciones para los últimos trimestres, que al finalizar registró un 2.9% (INEI, 2019). La nueva estimación incorpora una recuperación gradual y que un crecimiento y desarrollo producirá mejores ingresos al país y mayor desarrollo para los ciudadanos involucrados directa e indirectamente en esta actividad económica. Esto sin considerar aún los efectos negativos de la pandemia mundial debido a la COVID-19, cuya afectación vienen siendo materia de determinación por los especialistas en economía nacional y mundial (CAPECO, 2020).

En el país, los recursos pétreos y agregados son usados para diversos proyectos como la ejecución de obras tales como presas de gran dimensión, carreteras, construcción de túneles o mejoramiento de terrenos o terraplenes en donde existen grandes volúmenes de movimiento de tierras, por lo que se hace necesaria la correcta planificación y operación de los recursos que se emplean para la ejecución de dichos trabajos.

(Chau Lam, 2010) menciona que los proyectos en donde priman los entregables de movimiento de tierras, la maquinaria pesada representa aproximadamente entre un 20% hasta un 50% del costo total de operación. Esto justifica el estudio sobre la planificación.

Según (García J., 2017) en su investigación sobre mejora de la productividad, afirma que los estudios de productividad de maquinaria deben desarrollarse de manera continua, debido al avance diario de la obra teniendo siempre prioridades, ya sea la cantidad de equipos de cada frente o proceso; y también las prioridades que haya detectado gerencia vía oficina técnica. Recomienda además tener un área de productividad, dedicada única y exclusivamente a evaluar la productividad de equipos, pues se puede lograr aumentar la producción en un 15% aproximadamente.

Por otro lado, (Rua D., 2017) indica que el objetivo de la investigación con respecto al movimiento de tierras es el aplicar un modelo matemático en el

desarrollo de una herramienta de optimización de maquinaria, con el fin de minimizar el costo del sistema de distribución y transporte de los agregados, asignando el material producido en las diversas canteras a los diversos frentes de trabajo. El software fue implementado en el proyecto Vías Nuevas de Lima logrando minimizar el costo del transporte en un 7.46% (aplicación parcial) y una disminución en el costo total de transporte de 11.57% (aplicación total).

Sabemos que la tecnología se ha convertido en un aliado fundamental para reducir los costos en la construcción de diversas obras, tanto civiles y mineras; a través de modelos matemáticos que simulan las condiciones en las que se desarrollarán los proyectos a ejecutar. Por lo que esta investigación se apoya en este hecho para realizar softwares o programas que reciben data del proyecto a fin de brindar soluciones esperadas.

Ese mismo concepto de modelamiento y programación también se puede aplicar al segundo proceso dentro de la cadena de producción de valor, que es la construcción y mantenimiento de suelos compactados mediante la formulación de una herramienta para el dimensionamiento óptimo de maquinarias que realizan trabajos de compactación, apoyadas en la investigación de operaciones. Las consideraciones adoptadas se condensarán en un software en el que se diseñarán secciones de ingreso de datos, procesamiento y visualización de resultados.

Por todo lo expuesto, es de interés el desarrollo de un modelamiento que permita optimizar el sistema de compactación, ya que será fundamental en el desempeño real de la flota de equipos contratados y mejorará el costo asociado a tales recursos.

## 1.2. PROBLEMÁTICA

Teniendo un déficit de inversión en infraestructura de USD 160 000 millones de los cuales el 36% corresponde al sector de transporte (en nuestro país regulado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2020), el Perú se encuentra ubicado en el puesto 88 en infraestructura a nivel mundial, afectando directamente a la competitividad del país. Analizando dicha brecha, en el país los proyectos de infraestructura vial por fin han comenzado a reactivarse luego del aislamiento obligatorio decretado por el gobierno debido a la pandemia, siendo así que 65

proyectos, que incluyen ejecución de carreteras, puentes, mantenimientos viales y corredores viales han comenzado y/o reiniciado sus actividades constructivas.

De la misma forma, el impulso minero en el Perú vuelve a tomar protagonismo. Luego de la para por la pandemia, el Ministerio de Energía y Minas ha anunciado la operación de 60 proyectos mineros en 16 regiones del país con una inversión de más de USD 506 millones.

Todo lo anterior nos muestra que los proyectos, sobre todo, viales y mineros, en donde los trabajos de movimiento de tierras vienen a ser los más incidentes con respecto al costo y plazo, y en específico, los trabajos de reforzamiento y estabilización de suelos son entregables a los que se destina una mayor cantidad del presupuesto de obra.

El problema principal planteado en base a lo expuesto es el siguiente: ¿Existe una metodología analítica para realizar el dimensionamiento de maquinaria de compactación de suelos cuyo control de compactación se realiza por capas?

No hay evidencia sobre una metodología analítica, esto hace que se apele a la experiencia de los constructores para el diseño de la flota y por ende no se controla la producción en el tiempo ni el potencial de productividad que realmente se puede alcanzar y poder tener un ahorro en la presupuestación que puede ser reinvertida en otros proyectos del país y poder contribuir con el desarrollo del mismo.

Se consideran los siguientes problemas específicos:

- ¿Cómo se realiza el proceso de producción del reforzamiento, estabilización y/o compactación de suelos?
- ¿Cuáles son los factores que influyen en el proceso de compactación y cómo poder cuantificarlos a fin de poder elaborar la herramienta en cuestión?
- ¿Cómo establecer relaciones de correspondencia entre los factores para crear un modelo matemático y programarlo en lenguaje Java para poder emplearlo en teléfonos móviles y/o ordenadores?
- ¿Cómo determinar el beneficio económico de la optimización realizada?
- ¿Cuáles serían las limitaciones en el uso de nuestra herramienta, en qué tipos de obras se podría aplicar?

Por todo esto es necesario elaborar una herramienta para tal fin, de modo que asegure la cantidad, tipo y tiempo de uso óptimo de este tipo de maquinarias, logrando a su vez maximizar la rentabilidad y cumpliendo con la calidad indicada en las especificaciones técnicas o el estudio definitivo de ingeniería de cada proyecto en específico.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo General

Modelar y programar una herramienta para optimizar la flota de maquinaria de compactación masiva controlada en obras civiles y mineras, asignando la cantidad y tipo de equipo de compactación para un proyecto de construcción o mantenimiento determinado.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar y entender el proceso de compactación controlada desde la colocación del material a compactar hasta su aceptación final por parte del área de calidad.
- Identificar los factores que influyen en el proceso de compactación a fin de poder cuantificarlos y establecer las relaciones de correspondencia con el modelo matemático a desarrollar.
- Crear un software de dimensionamiento de flota de maquinaria que optimice el uso de la maquinaria en base a las características implícitas en todo el proceso de producción de la compactación.
- Cuantificar el potencial de beneficio económico, debido a la reducción de costos asociados al proceso y productividad de la flota de maquinaria determinada.
- Establecer las limitaciones a considerar en el uso de la herramienta.

## 1.4. HIPÓTESIS

### 1.4.1. Hipótesis General

Existe una relación lineal entre la optimización en el dimensionamiento de equipos de compactación y las condiciones del proyecto a ejecutar, así como también con las características propias del equipo a seleccionar.

### 1.4.2. Hipótesis Específicas

- Respecto a las condiciones del proyecto a nivel de ingeniería, estas dependen del tipo de suelo a compactar y del porcentaje de compactación especificado a fin de cumplir con la calidad.
- Respecto a las características de los equipos de compactación, dependerá de la capacidad de compactación de la maquinaria disponible, de manera específica el número de ciclos de compactado y ancho de compactación y del costo que implica emplear dichos equipos.
- Respecto a las condiciones propias del frente de trabajo, la cantidad de equipos estará limitada por el espacio disponible dentro de la obra.
- Al determinar las variables que intervienen en el proceso de compactación se puede formular un modelo matemático basado en programación lineal a fin de obtener una óptima cantidad de equipos para el trabajo en específico.
- Dicho modelo se desarrollará usando un lenguaje de programación comercial y pueda ser usado en los teléfonos móviles, a fin de poder emplear el programa o la aplicación móvil resultante en las diferentes fases de un proyecto y poder optimizar el costo del trabajo generando ahorro.

## CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1. INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

Es el campo que consiste en la aplicación de métodos analíticos, ya sea el modelamiento matemático, análisis estadístico y/o optimización matemática, con el objetivo de alcanzar soluciones óptimas en el uso de recursos para operaciones de construcción, industriales o administrativas. Esta considera una función objetivo con variables asociadas a las que se desean maximizar (ya sea el beneficio a lograr frente a un plan de producción) o minimizar (los costos que implican la elaboración de un producto o el riesgo asociado a una alternativa). Dichos valores de solución están restringidos por las limitantes propias del problema y el fin que persigue es tomar las mejores decisiones y que sirvan a lograr los objetivos del quien lo elabora (Hillier y Lieberman, 2010).

#### 2.1.1. Metodología de la Investigación de Operaciones

Dada la naturaleza de la investigación de operaciones IO, la definición del problema a resolver constituye un paso clave para que los resultados obtenidos del análisis sean útiles y efectivos para la organización en la que se desarrollará. Por lo tanto, en este paso se deberá definir el alcance del estudio, la información con que se cuenta y las restricciones del sistema, entre otras cosas relevantes para el caso en específico (Hillier y Lieberman, 2010).

Las etapas básicas para aplicar la IO en la práctica, una vez que se ha identificado y definido el alcance junto con las características del problema a resolver, son la formulación del modelo matemático, solución del modelo matemático y validación del modelo.

#### 2.1.2. Formulación del Modelo Matemático

Es la representación de una realidad mediante el uso de relaciones matemáticas, a través de la lógica, con el objetivo de ayudar en el proceso de toma de decisiones. En general, un modelo matemático de naturaleza lineal, que será estudiada en esta tesis, está compuesto de ecuaciones y/o desigualdades algebraicas (Taha, 2012).

### 2.1.2.1. Variables de Decisión

Representan las alternativas de solución del problema y son las variables no conocidas que deben ser determinadas en el modelo, es por ello son controlables. Pertenecen a la propia naturaleza del problema y no pueden ser establecidas arbitrariamente. Representan los recursos del problema como la cantidad de productos a elaborar, decisión de invertir cierto proyecto, cantidad de mano de obra a contratar, maquinaria a utilizar en un proceso constructivo y demás.

### 2.1.2.2. Función Objetivo

Es la representación matemática del objetivo a lograr en el problema de optimización, ya sea de maximización o minimización. Está expresada en función de las variables de decisión.

### 2.1.2.3. Restricciones

Son las relaciones entre las variables y los parámetros. Se representan por desigualdades o por ecuaciones y resultan de las limitaciones de recursos de producción, financieros, tecnológicos, entre otros.

## 2.1.3. Modelo de Programación Matemática

Para resolver un problema de optimización usando los conceptos descritos de IO, se debe de seguir los siguientes pasos (Kong, 2010):

- Formular un modelo del problema a través de un programa matemático.
- Resolver el programa matemático.

A partir de la definición o enunciado del problema, los pasos que usualmente se aplican para la formulación o propuesta del modelo son los siguiente:

- Se determinan las variables de entrada y las variables de salida, siendo estas últimas las que dependen de la primera luego de expresarlas dentro de una función de optimización.
- Se determinan las condiciones, requisitos y limitaciones; y todas ellas se expresan mediante restricciones matemáticas que delimitarán el campo de opciones de las variables de decisión.

- Se añaden condiciones adicionales que aterrizarán el modelo aún más a la realidad, por ejemplo, el condicionar a las variables de decisión en tomar valores mayores o iguales a cero.

Luego de obtenido el modelo queda resolverlo mediante los diversos métodos que se conocen, a fin de encontrar el valor, o los valores que optimizarán nuestro problema, ya sea de maximización o minimización.

#### 2.1.4. Programación Lineal

El término programación proviene de la palabra planeamiento y planificación. El término lineal indica que las expresiones matemáticas empleadas serán funciones lineales (función polinómica de primer grado). En ese sentido, la programación lineal es el planeamiento de actividades o procesos con el fin de optimizar el uso de los recursos, es el resultado que mejor alcance la meta específica entre todas las alternativas factibles de acuerdo con el modelo matemático (Taha, 2012).

La función matemática  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  es lineal si la representación polinómica es de primer grado y es la suma de múltiplos de las variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , es decir:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

En donde:  $c_1, c_2, \dots, c_n$  son constantes.

La programación lineal conforma un importante campo en el estudio de la optimización de recursos, ya que en investigación de operaciones muchos de los problemas de ingeniería pueden plantearse como problemas de programación lineal, algunos de los ejemplos son los problemas transporte balanceado, problemas de asignación de actividades, programación de partidas de trabajo, determinación de ruta óptima, administración de recursos hídricos entre otros.

En el desarrollo de esta tesis, se utilizarán los conceptos de programación lineal como fundamento principal del problema de optimización del dimensionamiento de flotas de maquinaria para compactación masiva.

#### 2.1.5. Formulación del Problema de Programación Lineal

Un problema de programación lineal, de maximización o minimización, tiene la forma:

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

sujeto a las siguientes restricciones o condiciones

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_2$$

...

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_i$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \quad \{\leq, =, \geq\} \quad b_m$$

En donde:

Las variables son  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Las constantes son  $c_1, c_2, \dots, c_n, a_{11}, a_{12}, \dots, a_{m1}, a_{mn}, b_1, b_2, \dots, b_m$ .

Las restricciones tienen un único signo  $\leq, =, \text{ o } \geq$ .

La función objetivo  $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$  así como también las funciones que definen los miembros izquierdos de las condiciones o restricciones son funciones lineales de las variables de decisión  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Según (Kong, 2010), las constantes  $c_1, c_2, \dots, c_n$  de la función objetivo se les suele denominar como costos o coeficientes de costos.

Se les denomina solución factible a las combinaciones de los valores de  $x_1, x_2, \dots, x_n$  que cumplan con todas las restricciones. A fin de optimizar, ya sea maximizar o minimizar, la función objetivo  $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$  del problema se debe evaluar con todas las soluciones factibles e indicar la solución óptima.

#### 2.1.6. Métodos de Solución para los Problemas de Programación Lineal

La programación lineal debe ser resuelta por métodos cuantitativos. Estos métodos pueden ser el método geométrico, el método simplex y sus variaciones.

- Método Geométrico

El método geométrico o gráfico se utiliza para la solución de problemas de programación lineal, graficando las restricciones y la función objetivo en un plano

cartesiano de dos y tres dimensiones. Debido a la limitación de dimensiones espaciales el método gráfico no se puede aplicar para modelos con variables mayores a tres, es por ello que se debe optar por otro método de solución.

- Método Simplex

El método simplex es usado para resolver problemas de programación lineal en los que intervienen tres o más variables. Las bases del método simplex son el álgebra matricial y el proceso de eliminación de Gauss-Jordan para resolver un sistema de ecuaciones lineales.

Si los modelos lineales solo tienen restricciones de " $\leq$ ", se pueden resolver usando variables de holgura con el método simplex, para otros modelos que tengan restricciones de tipo " $\geq$ " e " $=$ " se hace necesario usar otros métodos de solución.

Cuando nuestro modelo a solucionar posee restricciones del tipo " $\geq$ " e " $=$ " se debe usar una de las siguientes variantes del método simplex: el método de la M grande o el método de las dos fases. Debido a la propia naturaleza del modelo que se pretende optimizar en esta investigación, se hace necesario recurrir a la utilización de los métodos de solución descritos líneas arriba.

Agregar también que se cuenta en la actualidad con programas de cómputo que resuelven este tipo de problemas, como es el caso de los softwares LINDO, Excel SOLVER o los programas en línea como PHP Simplex, entre otros.

#### 2.1.7. Otros Modelos de Programación

##### 2.1.7.1. Programación No Lineal

Es importante resaltar que las funciones o relaciones matemáticas que se generan en varios problemas no son lineales o totalmente lineales. Gran parte de los problemas del mundo real que generan expresiones lineales son menores en cantidad de las que generan relaciones no lineales.

Un supuesto importante de la programación lineal es que todas sus funciones, tanto objetivo y restricción, sean lineales (Hillier y Lieberman, 2010). Esto ha ayudado a los modeladores a enfrentar múltiples problemas, pero se debe tener en cuenta, no solo las omisiones que estas pueden causar, sino también la fidelidad o aproximación del modelo que pueda generarse a partir de tal

suposición. Es por ello la importancia de formular problemas de programación no lineal acorde a la realidad a optimizar.

En general, el problema de programación no lineal consiste en encontrar  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  para,

$$\text{Max o Min } f(x),$$

sujeta a

$$g_i(x) \leq b_i; \text{ para } i = 1, 2, \dots, m,$$

y

$$x \geq 0$$

Donde:  $f(x)$  y  $g_i(x)$  son funciones dadas de  $n$  variables de decisión.

Cuando un problema de programación no lineal posee una o dos variables, se puede representar de forma gráfica. Si las funciones no son lineales, se graficarán curvas en lugar de rectas, por lo que la región factible de las variables de decisión cambiará drásticamente y, su resolución requerirá de métodos laboriosos para su obtención.

Los problemas de programación lineal son variados, estos dependen de las características de las funciones  $f(x)$  y  $g_i(x)$ . Existen diversos algoritmos para resolver los diferentes tipos de problemas de esta naturaleza.

#### 2.1.7.2. Programación Entera

Una limitación importante que impide muchas otras aplicaciones es el supuesto de divisibilidad, que requiere que las variables de decisión puedan tomar valores no enteros. En muchos problemas prácticos, las variables de decisión solo tienen sentido real si su valor es entero. Como es el caso de asignación de personal, cantidad de autos a producir o como la materia de estudio de esta tesis, que es el hecho de dimensionar la cantidad de maquinaria para un trabajo de compactación en específico, entre otros. Si el hecho de exigir valores enteros es la única diferencia que tiene un problema con la formulación de programación lineal, entonces se trata de una programación entera (Hillier y Lieberman, 2010).

### 2.1.7.3. Programación Dinámica

Esta técnica matemática nos permitirá resolver múltiples problemas secuenciales optimizando cada uno de estos y se obtendrá como resultado una combinación de soluciones que maximiza la efectividad total.

(Taha, 2012) plantea que la idea principal de la programación dinámica es “descomponer el problema en subproblemas más manejables. Entonces los cálculos se realizan recursivamente, donde la solución óptima de un subproblema se utiliza como dato de entrada al siguiente problema. La solución para todo el problema está disponible cuando se soluciona el último subproblema. La forma en que se realizan los cálculos recursivos depende de cómo se descomponga el problema original. En particular, normalmente los subproblemas están vinculados por restricciones comunes. La factibilidad de estas restricciones comunes se mantiene en todas las iteraciones”.

## 2.2. MECÁNICA DE SUELOS

Según (Braja Das, 2013), la mecánica de suelos es la aplicación de la ciencia física que se ocupa del estudio de las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de las masas de suelo sometidos a diferentes tipos de fuerzas.

En la construcción de terraplenes para carreteras o vías de asfalto, presas de tierra y muchas otras estructuras propias de la ingeniería civil, los suelos deben ser compactados a fin de incrementar sus pesos específicos, este proceso incrementa también las características de resistencia del suelo y con esto aumentar la capacidad de carga de las cimentaciones que serán construidas sobre ellos. La compactación disminuye la cantidad de asentamientos no deseados de las estructuras y produce un aumento en la estabilidad de taludes de los terraplenes. Los rodillos lisos o de ruedas lisas, los rodillos pata de cabra, los rodillos con neumático de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación de suelos en general, mientras que los rodillos vibratorios se utilizan principalmente para la densificación de suelos granulares.

En línea con la definición dada, esta investigación de tesis tomará la teoría de la compactación de suelos para modelar el programa de optimización.

### 2.2.1. Origen de los Suelos

Los suelos son materiales no consolidados compuestos de partículas minerales que pueden contener sustancias orgánicas. Básicamente son depósitos de rocas desintegradas que lentamente se han estado fragmentando por procesos físicos y químicos.

Los procesos físicos incluyen el congelamiento, descongelamiento, rodado, graduación natural y erosión. Mientras que los procesos químicos forman suelos arcillosos. La arcilla es diferente de la arena y grava ya que se componen de partículas pequeñas y planas provenientes de una variedad de rocas. La materia orgánica forma suelos esponjosos y pésimos para cimentar estructuras.

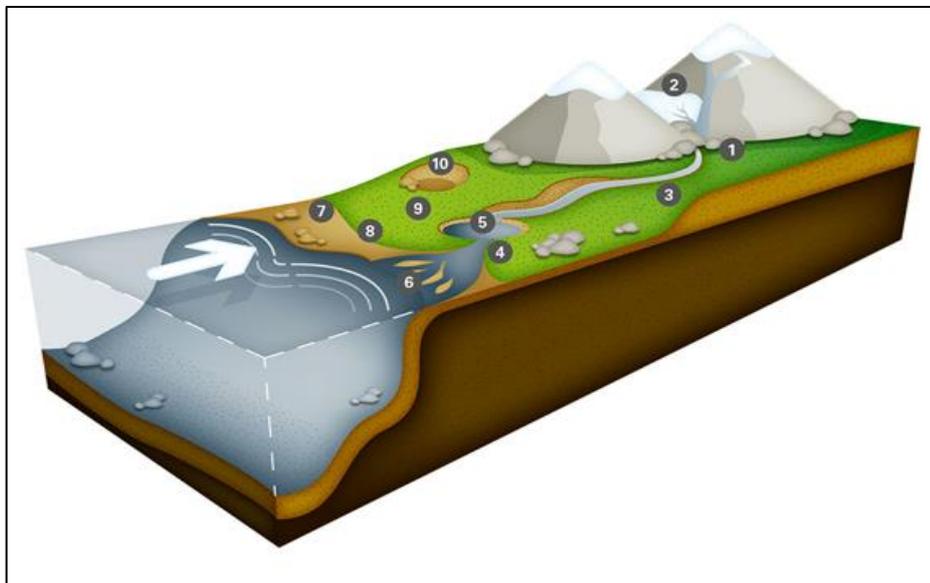


Figura 2.1. Proceso de Formación de los Suelos.

Fuente: Caterpillar (2013)

El proceso de formación de suelos (figura 2.1.) está compuesto por:

- 1) Suelos residuales o roca pre-existente fragmentada.
- 2) Depósitos glaciares o materiales acarreados o creados por capas de hielo.
- 3) Depósitos fluvioglaciares o materiales transportados por el agua de capas de hielo derretidas.
- 4) Depósitos fluviales.
- 5) Sedimentos de lagos.
- 6) Suelos aluviales.
- 7) Sedimentos lavados por oleaje.

- 8) Depósitos creados por viento.
- 9) Suelos orgánicos o descomposición de la vegetación.
- 10) Suelos hechos por el hombre que fueron procesados por voladura o trituración.

### 2.2.2. Tipos de Suelo

Los suelos varían debido a su composición química y física. Sin embargo, la ingeniería reconoce seis tipos fundamentales: bloque, guijarro, grava, arena, limo y arcilla.



Figura 2.2. Tipos de Suelo.

Fuente: Braja Das (2013)

Estos tipos de suelo generalmente se clasifican por el tamaño de las partículas que a la vez se determina por medio de un proceso llamado tamizado que consiste

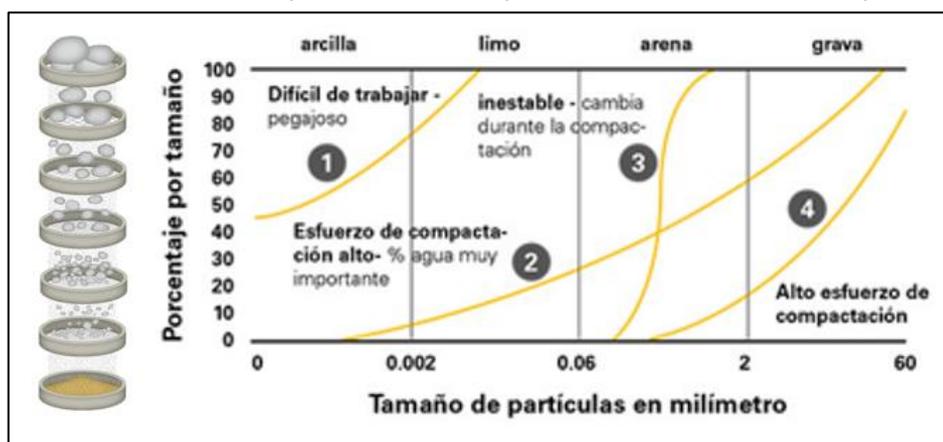


Figura 2.3. Distribución del tamaño de partículas.

Fuente: Caterpillar (2013)

en pasar una mezcla de partículas de diferentes tamaños por un tamiz<sup>1</sup> en donde las partículas de menor tamaño atraviesan el filtro por los orificios, las de mayor tamaño quedan retenidas y los porcentajes de suelos muy finos se clasifican con un diferente tamiz y se realiza la Prueba del Hidrómetro<sup>2</sup>.

Es por ello que los datos y detalles precisos de cada país varían, pero se tiene un sistema desarrollado por una de estas dos fuentes: la Organización Internacional para la Estandarización ISO, por sus siglas en inglés, o por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales ASTM, por sus siglas en inglés que, a pesar de no coincidir con precisión, ambos sistemas son muy similares. En el Perú se realiza el Ensayo de Análisis Granulométrico según la Norma Técnica Peruana NTP 339.128, basado en la prueba D-422 de la ASTM.

#### 2.2.2.1. *Suelos Cohesivos y No Cohesivos*

A pesar de que es útil conocer la composición exacta del material, resulta más práctico entender cómo reacciona ante la aplicación de varias fuerzas. Es por eso que los profesionales que trabajan con suelos clasifican los materiales en cuatro tipos básicos: cohesivos, semicohesivos, no cohesivos y orgánicos. Cada tipo reacciona de manera diferente ante la aplicación de fuerzas. La manera de cómo reaccionan dicta qué tan ideales son para efectos de diseñar la construcción, así como también los medios a utilizar para trabajar con cada suelo. Como se mencionó anteriormente, los materiales de suelo orgánico no son ideales para efectos de construcción.

Cuando un material no es el adecuado, se reemplaza o se utilizan varios medios para mejorar sus características. A este proceso se le llama “estabilización”. Las soluciones pueden incluir la estabilización química (por ejemplo, la adición de cemento Portland, limo, ceniza volátil o cloruro de calcio) o estabilización mecánica, la cual incluye la adición de agregados o uso de geosintéticos para reforzar el suelo.

---

<sup>1</sup> El tamiz es un utensilio que se utiliza para separar las partes finas de las gruesas de las partículas que conforman una muestra de suelo determinado y que está formado por una tela metálica o rejilla tupida que está sujeta a un aro. También conocido como cedazo o criba.

<sup>2</sup> Consiste en dispersar (suspender) una muestra de suelo en agua dentro de un cilindro graduado. El tiempo que toma el material en asentarse en el fondo se utiliza para clasificarlos por tamaño.

Es por ello que en el proceso de compactación de suelos el agua es de suma importancia. Las características físicas de cada tipo definen cómo reacciona con la humedad. Por cada material hay un contenido de humedad que maximiza sus propiedades para diseñar cierta compactación. En general, mientras más pequeñas sean las partículas, mayor influirá el agua sobre la compactación. La adición de agua mejora la cohesión y lubricación, pero el exceso de esta puede ocasionar la saturación que hace que los vacíos se llenen con agua y debiliten la capacidad de resistencia a la carga de la estructura proyectada.

Tabla 2.1. Características de los suelos cohesivos y no cohesivos.

TIPO DE SUELO	APARIENCIA Y/O TACTO	MEZCLA CON AGUA	HÚMEDO	SECO
Suelos granulares, arenas finas y limos	Se pueden ver los granos gruesos. Se sienten grumosos al friccionarlos entre los dedos.	Se mezclan cuando se agrega agua y agitan en la palma de la mano. Se separan cuando se dejan de agitar.	Muy poca o nula plasticidad.	La resistencia cohesiva es poca o nula. La muestra se deshace con facilidad.
Suelos cohesivos, mezclas y arcillas	No se pueden ver los granos a simple vista. Se sienten suaves y aceitosos al friccionarlos entre los dedos.	No se mezclan cuando se agita con agua en la palma de la mano.	Plásticos y pegajosos. Se pueden compactar.	Alta resistencia cuando seco. Difícilmente se deshacen. Saturación lenta en agua.

Fuente: Braja Das (2013)

### 2.2.3. Prueba/Ensayo Proctor

Siempre se ha entendido la importancia que la compactación de suelos tiene para la construcción de diversas obras de ingeniería civil. Pero no fue sino hasta el año 1933 que el ingeniero Proctor<sup>3</sup>, desarrolló un método para determinar el contenido óptimo de humedad en el material y su correspondiente densidad seca máxima.

<sup>3</sup> Ralph R. Proctor (1894-1962), ingeniero civil e investigador hidráulico – geotecnista, que desarrolló el método que lleva su nombre. Laboró en la Oficina de Obras y Suministros de Agua de EEUU.

### 2.2.3.1. Prueba de Proctor Estándar

En la prueba de Proctor estándar se determina el contenido óptimo de humedad en un material que permita producir la densidad seca máxima mediante la aplicación de fuerzas de compactación.

El suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 943.30 cm<sup>3</sup>. El diámetro del molde es de 101.60 mm. Durante la prueba de laboratorio, el molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior. El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pisón que transmite 25 golpes a cada capa. El pisón pesa 24.40 N y tiene una altura de caída de 304.80 mm. Para cada prueba, el peso específico húmedo de compactación  $\gamma$  se calcula como:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}}$$

Donde:

$W$  = Peso del suelo compactado en el molde.

$V_{(m)}$  = Volumen del molde (para las dimensiones dadas es 943.30 cm<sup>3</sup>).

Para cada prueba, el contenido de agua del suelo compactado se determina en el laboratorio. Con un contenido de agua conocido, el peso específico seco  $\gamma_d$  se calcula con la ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Donde:

$w(\%)$  = Porcentaje de contenido de agua.

Los valores de  $\gamma_d$  determinados con la ecuación dada se grafican versus los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo (ver figura 2.4.).

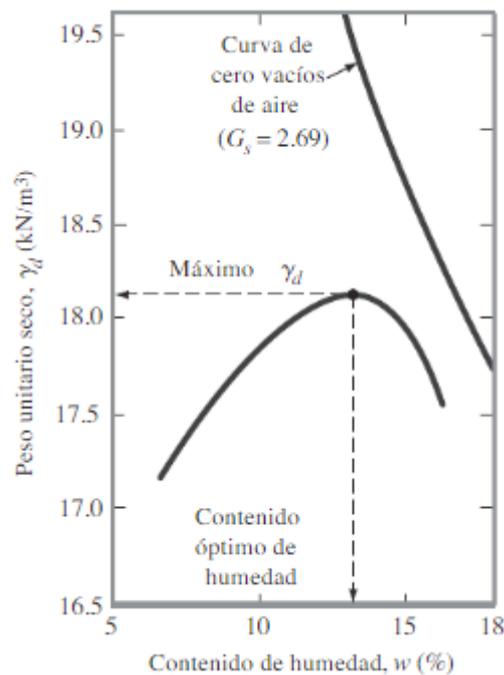


Figura 2.4. Resultados de la prueba de compactación Proctor Estándar para arcilla limosa.  
Fuente: Braja Das (2013)

Para un contenido de agua determinado, el peso específico seco máximo teórico se obtiene cuando no existe aire en los espacios vacíos, es decir, cuando el grado de saturación es igual al 100%. Así entonces, el peso específico seco máximo a un contenido de agua dado, con cero vacíos de aire se expresa como:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e}$$

Donde:

- $\gamma_{zav}$  = Peso específico con cero vacíos de aire.
- $\gamma_w$  = Peso específico del agua.
- $e$  = Relación de vacíos.
- $G_s$  = Densidad de sólidos del suelo.

Siendo para un grado de saturación del 100% la relación  $e = wG_s$ , por lo que

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + w G_s} = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_s}}$$

Donde:

w = Contenido de agua.

El procedimiento para la prueba Proctor estándar se da en la prueba D-698 de la ASTM y en la sección MTC E 116 del Manual de Ensayo de Materiales y elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

#### 2.2.3.2. Prueba de Proctor Modificado

Los ensayos de Proctor modificado se utilizan para suelos cuyas estructuras requieren mayor resistencia para cargas extremadamente pesadas o limitar asentamientos.

Debido a la proliferación de rodillos pesados para la compactación en la industria de la construcción, la prueba de Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. A esta nueva prueba se le denominó prueba Proctor modificado. Para llevar a cabo la prueba Proctor modificada se usa el mismo molde de 943.30 cm<sup>3</sup>, como en el caso de la prueba Proctor estándar, sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 44.50 N. La caída del martillo es de 457.20 mm. El número de golpes de martillo por capa es de 25 como en el caso de la prueba de Proctor estándar.

Debido al incremento del esfuerzo de compactación, la prueba de Proctor modificado resulta en un incremento del peso específico seco máximo del suelo. Tal incremento es acompañado por un decremento del contenido de agua óptimo (ver figura 2.5.).

El procedimiento para la Prueba Proctor Modificado se da en la prueba D-1557 de la ASTM y en la sección MTC E 115 del Manual de Ensayo de Materiales y elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

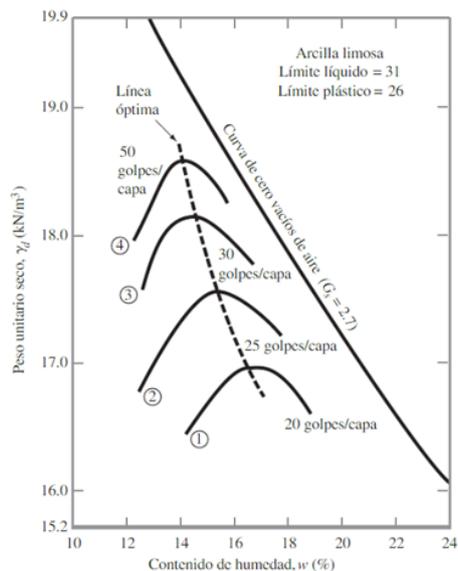


Figura 2.5. Efectos del incremento de la energía de compactación en una arcilla limosa.

Fuente: Braja Das (2013)

En la figura 2.6. se puede comparar las curvas de compactación de un mismo suelo con el Proctor estándar y Proctor modificado.

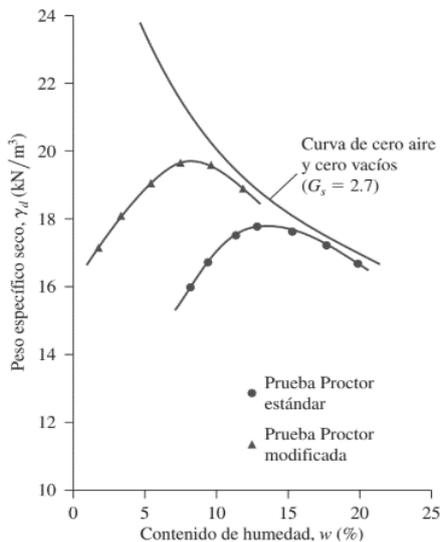


Figura 2.6. Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificada para un limo arcilloso.

Fuente: Braja Das (2006)

En ambos casos las pruebas de laboratorio determinarán el contenido de humedad que le permitirá al suelo alcanzar su máxima densidad. Las densidades

que se pretenden alcanzar en campo se especifican con base en los porcentajes obtenidos en laboratorio para las densidades secas máximas. Veamos las comparaciones entre ambos ensayos.

Tabla 2.2. Cuadro comparativo Proctor Estándar vs. Proctor Modificado.

Elemento	Pruebas Proctor					
	Proctor Estándar (ASTM 698)			Proctor Modificado (ASTM Prueba 1577)		
Diámetro del molde (mm)	101.60	101.60	152.40	101.60	101.60	152.40
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	943.30	943.30	2124.00	943.30	943.30	2124.00
Peso del martillo (N)	24.40	24.40	24.40	44.50	44.50	44.50
Altura de la caída del martillo (mm)	304.80	304.80	304.80	457.20	457.20	457.20
Nro golpes por capa de suelo	25.00	25.00	56.00	25.00	25.00	56.00
Nro capas de compactación	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00
Energía de compactación (kN-m/m <sup>3</sup> )	591.30	591.30	591.30	2696.00	2696.00	2696.00
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz #4 (4.57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz #4.	Porción que pasa el tamiz de 9.50 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz #4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.50 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.	Porción que pasa el tamiz #4 (4.57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz #4.	Porción que pasa el tamiz de 9.50 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz #4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.50 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

Fuente: Braja Das (2013)

Se concluye que el peso específico seco máximo y el contenido óptimo de agua dependen del grado de compactación.

### 2.2.3.3. Porcentaje de Compactación en Campo

En la mayoría de las especificaciones para el trabajo con suelos, una condición es que el contratista debe lograr un peso unitario seco de campo compactado de 90 a 95% del peso unitario máximo determinado en el laboratorio mediante la prueba Proctor, ya sea estándar o modificada. Esta especificación es referida para la compactación relativa R que puede expresarse como

$$R(\%) = \frac{\gamma_{d(\text{campo})}}{\gamma_{d(\text{máx-lab})}} \times 100$$

Donde:

- $R(\%)$  = Porcentaje de compactación de campo.  
 $\gamma_{d(\text{campo})}$  = Peso unitario seco de campo compactado.  
 $\gamma_{d(\text{máx-lab})}$  = Peso unitario máximo de laboratorio.

La compactación de campo sobre la base de la compactación relativa o de la densidad relativa es una especificación del producto final. Se espera que el contratista logre un peso unitario seco mínimo independientemente del procedimiento de campo adoptado y de acuerdo a la ingeniería del proyecto.

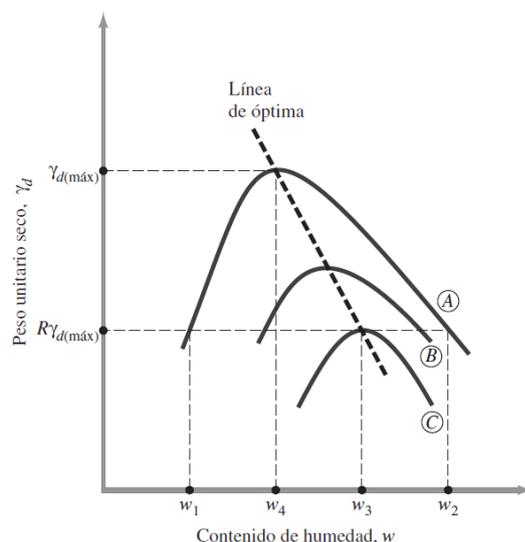


Figura 2.7. Condición de compactación más económica.

Fuente: Braja Das (2013)

La condición de compactación más económica se explica con la figura 2.7. Las curvas A, B y C son el mismo suelo compactados bajo distintos esfuerzos, siendo A el de máximo esfuerzo de compactación, es decir, posee el peso seco máximo unitario (sacado de laboratorio) con su respectivo porcentaje de humedad. Mientras que B es el compactado bajo un esfuerzo menor al de A y C es el compactado con el esfuerzo necesario que provoque una densidad seca mínima que esté dentro del rango que demanda el proyecto. Por lo que, en campo, tanto el % de compactación (que varía entre  $w_1$  y  $w_2$ ) como el contenido de humedad

(que varía entre  $\gamma_{d(máx)}$  y  $R\gamma_{d(máx)}$ ) tienen un rango (o una permisión) que hace que la compactación fluctúe en un intervalo a fin de hacer posible la compactación de todo un volumen de suelo en condiciones reales de obra.

#### 2.2.4. Propiedades de Suelo

En el desarrollo de las obras, se utilizan varios términos para definir las características y propiedades de los suelos. Es sumamente importante conocerlos para poder entender los principios y técnicas de la compactación de suelos.

- Resistencia a la carga

Es la propiedad más importante de la estructura de una carretera. En términos más simples, es la capacidad que una estructura tiene para soportar el peso que carga. Regularmente el análisis de la resistencia a la carga se realiza con la ayuda de un camión de volteo con carga (conocido también como rodado de comprobación) para ver si hace surcos o la prueba de placa de carga.

- Capilaridad

Es la capacidad que tiene un suelo para forzar el agua hacia arriba o a los lados. La característica que se desea en un material base utilizado como capa entre la subrasante y el pavimento de una carretera es que actúe como barrera capilar evitando el movimiento capilar ascendente del agua desde dicho nivel. Sin una barrera capilar en la base, el agua atrapada ablanda y expande la subrasante haciendo que la superficie pierda el soporte adecuado y que la carretera se deteriore prematuramente.

- Compresibilidad

Es el índice de la reducción en volumen de un suelo al aplicársele una fuerza. Los suelos con alta compresibilidad tienen partículas que fácilmente se organizan para reducir el espacio de vacíos de aire o agua. En condiciones húmedas, los suelos arcillosos regularmente tienen mayor compresibilidad que los suelos granulares, pero tienen menor permeabilidad que hace que se drenen y compriman muy lentamente. Cuando repentinamente reciben una carga, por ejemplo, del rodillo,

la presión del agua se acumula en suelos de grano fino y produce una compresibilidad incrementada.

### 2.2.5. Límites del Suelo

Los límites del suelo muestran la influencia con la que el contenido de humedad afecta la compactabilidad de un suelo cohesivo (arcilla).

Atterberg<sup>4</sup> desarrolló ciertos límites de consistencia del suelo: límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y límite de encogimiento. Estos límites son la base para diferenciar la plasticidad alta, ligera y no plástica en los materiales.

#### 2.2.5.1. Límite Líquido LL

El contenido de humedad con la que el suelo pasa de estado plástico a líquido es el límite líquido LL. Esto significa que hay suficiente humedad en el suelo para abatir la fricción interna y cohesión.

Para determinar el LL existe una prueba sencilla. Se toma una muestra húmeda de suelo, se coloca dentro de un tazón pequeño y se aplasta para que la superficie quede nivelada. Luego se le hace una concavidad profunda y se le dan pequeños golpecitos en la parte inferior del tazón (10-30 veces) tratando de observar la concavidad. Si las caras de la concavidad conservan la misma distancia de separación, se agrega más agua y se repite el proceso. Cuando las caras de la concavidad se junten a una distancia de 15 mm (1/2"), la muestra se habrá vuelto algo líquida y se habrá llegado a su LL.

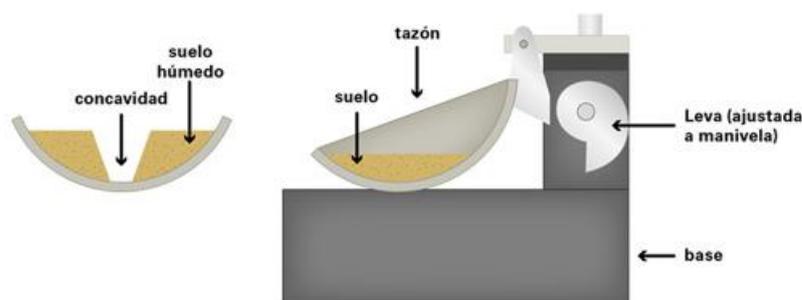


Figura 2.8. Aparato usado para probar el límite líquido simple.

Fuente: Caterpillar (2013)

<sup>4</sup> Albert Mauritz Atterberg (1846-1916) fue un químico y científico agrícola sueco que creó los límites de Atterberg, a lo que hoy se refieren comúnmente los ingenieros geotecnistas y geólogos para clasificar a los suelos en base al contenido de humedad que poseen.

Los LL altos se asocian a suelos con compresibilidad alta. Regularmente las arcillas tienen LL altos; los suelos arenosos tienen LL bajos.

El procedimiento para el Límite Líquido se da en la prueba D-4318 de la ASTM y en la sección MTC E 110 del Manual de Ensayo de Materiales y elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

#### 2.2.5.2. Límite Plástico PL

Esta condición se presenta cuando el suelo cambia de estado semisólido a plástico. Cuando contiene justo la cantidad suficiente de humedad, se puede enrollar y formar hebras de aproximadamente 3 mm (1/8") de diámetro sin romperse.

El límite plástico PL del suelo es importante ya que representa el contenido de humedad en el que las partículas se deslizan sobre sí mismas y tienen la cohesión adecuada. Es el punto donde se presenta la mejor compactación con suelos altamente arcillosos. La resistencia del suelo se reduce rápidamente conforme el contenido de humedad excede el PL.

El procedimiento para el Límite Plástico se da en la prueba D-4318 de la ASTM y en la sección MTC E 111 del Manual de Ensayo de Materiales y elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

#### 2.2.5.3. Índice de Plasticidad PI

Es la diferencia numérica entre el límite plástico y el límite líquido de un suelo. Los suelos con índice de plasticidad PI altos son más compresibles y tienen mayor cohesión. El suelo es poco o nada cohesivo cuando el contenido de humedad está en el límite líquido, pero es altamente cohesivo cuando el contenido de humedad está en el límite plástico.



Figura 2.9. Índice de plasticidad PI.

Fuente: Caterpillar (2013)

El PI también está relacionado con la permeabilidad. A mayor PI, menor permeabilidad y a menor PI, mayor permeabilidad. En muchas construcciones donde se trabaja con suelos con alto contenido de arcilla, las especificaciones requieren material con cierta graduación, LL máximo y PI máximo.

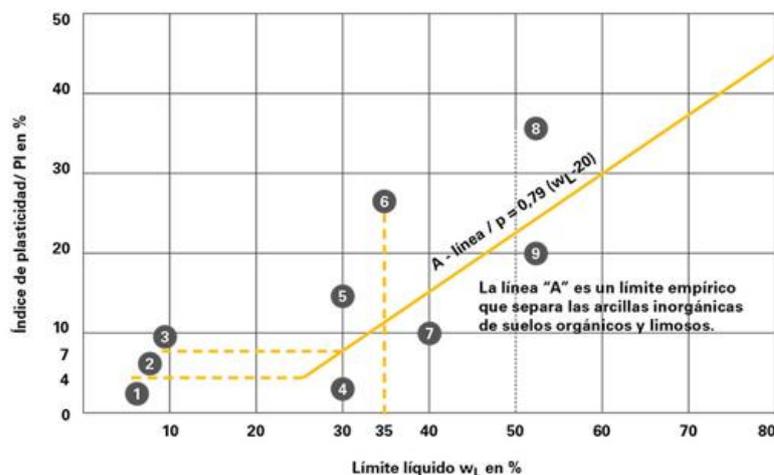


Figura 2.10. Índice de plasticidad (en %) vs. Límite líquido (en %).

Fuente: Caterpillar (2013)

De la figura 2.19., siendo la línea A un límite empírico que separa arcillas de suelos orgánicos, podemos extraer los siguientes tipos de suelo:

- 1) Arena-Limo.
- 2) Rango intermedio.
- 3) Arena-Arcilla.
- 4) Limos de plasticidad ligera.
- 5) Arcillas de plasticidad ligera.
- 6) Arcillas de plasticidad media.
- 7) Limos con aditivos orgánicos o limos organogénicos y limos de plasticidad media.
- 8) Arcillas de plasticidades diferentes.
- 9) Arcillas con aditivos orgánicos y limos de diferentes compresiones.

#### 2.2.6. Sistema de Clasificación de Suelos

En la actualidad existen diversos sistemas de clasificación de suelos utilizados en todo el mundo. Todos ellos utilizan términos como grava, arena, limo y arcilla, pero con sistemas numéricos y alfabéticos ligeramente diferentes. El propósito de la

clasificación de suelos es crear estándares mediante los cuales se puedan identificar los suelos y sus características en la ingeniería geotécnica.

### 2.2.6.1. Sistema de Clasificación AASHTO

El sistema de clasificación de suelos ampliamente utilizado es el de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés), el cual se basa en el rendimiento de los suelos para la construcción de carreteras. El sistema divide materiales en siete (7) grupos principales con algunos subgrupos. Los grupos están clasificados en dos categorías principales: materiales granulares y materiales limosos-arcillosos.

Tabla 2.3. Clasificación de suelos para subrasante AASHTO.

Clasificación General	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el #200)							Limo y arcilla (más del 35% pasando por el #200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
<b>Análisis de tamiz (% de paso)</b>											
#10	0-50		51-100								
#40	0-30	0-50	0-10	0-35	0-35	0-35	0-35	36-100	36-100	36-100	36-100
#200	0-15	0-25									
<b>Características de la fracción de paso #40</b>											
Límite líquido				0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+	0-40	41+
Índice de Plasticidad		0-6	N.P.	0-10	0-10	11+	11+	0-10	0-10	11+	11+
<b>Tipos comunes de materiales significativos constituyentes</b>	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
<b>Clasificación General de la Subrasante</b>	Excelente a bueno							Regular a malo			

Fuente: Braja Das (2013)

### 2.2.6.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, por sus siglas en inglés), es un método de clasificación de suelos ampliamente utilizado en los proyectos de construcción. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América y el Buró de Rehabilitación de Suelos de los Estados Unidos de América desarrollaron este sistema el cual utiliza la textura como término descriptivo. Este sistema clasifica a los suelos en dos grandes categorías presentadas en la tabla 2.4.:

- 1) Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% que pasa a través del tamiz #200. Los símbolos de grupo

comienzan con un prefijo de G o S. Siendo G para el suelo de grava o grava, y S para la arena o el suelo arenoso.

- 2) Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz #200. Los símbolos de grupo comienzan con prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para los suelos altamente orgánicos.

Para complementar la clasificación tenemos a los suelos bien clasificados con el sufijo W, P para los suelos mal clasificados, L para los suelos de baja plasticidad (LL menor de 50) y H para los suelos de alta plasticidad (LL mayor de 50).

Tabla 2.4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Grupo de Suelo	Símbolo	Rango de Tamaño	
<b>Roca</b>	<b>Ninguno</b>	12" a más	
<b>Canto rodado</b>	<b>Ninguno</b>	75 mm (3") a 12"	
<b>1- Suelos de grano grueso</b>			
<b>Grava</b>	<b>G</b>	75 mm (3") a tamiz #4 (4.25 mm)	
Grava gruesa		75 mm a 19 mm	
Grava fina		tamiz #4 a 19 mm	
<b>Arena</b>	<b>S</b>	Tamiz #4 a tamiz #200 (0.075 mm)	
Arena gruesa			
Arena mediana			
Arena fina			
<b>2- Suelos de grano fino</b>			
Finos		Menos del tamiz #200	
Limos	<b>M</b>	Usar los límites de Atterberg	
Arcilla	<b>C</b>	Usar los límites de Atterberg	
<b>3- Suelos orgánicos</b>			
	<b>O</b>	Usar los límites de Atterberg	
<b>4- Material orgánico pardo</b>			
	<b>Pt</b>	Identificación visual	
Símbolo de graduación		Símbolo de límite líquido	
Bien graduada	<b>W</b>	Límite líquido alto	<b>H</b>
Pobremente graduada	<b>P</b>	Límite líquido bajo	<b>L</b>

Fuente: Braja Das (2013)

### 2.3. MAQUINARIAS DE MOVIMIENTO DE TIERRAS

Según (Torres y Villanueva, 2014), se denomina movimiento de tierras a las operaciones y trabajos realizados en los procesos de construcción en los cuales está involucrado el suelo o tierra en su forma natural; con la finalidad de modificar el relieve natural y/o aportar materiales útiles en obras civiles y mineras de cualquier índole. Debido a que estas operaciones involucran distintos tipos de recursos en el proceso de ejecución es necesario emplear los conocimientos

técnicos y científicos para optimizar dichos recursos en tiempo y costo, siendo esto el fin de la presente investigación.

Tan importante como entender el desarrollo y características de un proyecto de movimiento de tierras, es también conocer los diversos equipos y el papel que juegan dentro del proceso de producción.

A continuación, se muestran las maquinarias de movimiento de tierras más usadas en la industria de la construcción y sus principales características:

### 2.3.1. Maquinarias de Excavación

#### 2.3.1.1. *Tractor de Orugas*

Maquinaria diseñada para realizar trabajos de tracción y/o tiro. El tractor de orugas por la tracción, la alta flotación y mayor área de contacto con el piso de las zapatas se puede aplicar en casi todo tipo de terreno. La aplicación más común es en corte y posterior empuje de material, esto debido a la gran fuerza de dislocación y producción comparada con otros equipos como la excavadora. Es también empleado para apertura de vías, limpieza y desbroce.



Figura 2.11. Tractor Caterpillar D6T en proceso de corte y empuje frontal.

Fuente: Elaboración Propia

El equipo posee dos herramientas tales como: la hoja topadora; ubicada en la parte delantera del equipo es para cortar y empujar material, y el escarificador denominado *ripper*; ubicado en la parte posterior (pueden ser más de un *ripper* según aplicación) sirve para romper y desgarrar material.

El tractor recomendado en la industria de la construcción es el D6T (peso aproximado de 20.60 t) por la versatilidad en desplazamiento en terreno horizontal, pendientes de subida, bajadas, movimiento lateral y gran maniobrabilidad.

Caterpillar posee las gráficas de producción (figura 2.21.) para los modelos D11R (A), D11R CD (B), D10R-10U (C), D9R-9U (D), D8R-8U (E), D7R-7U (F) y D7G-7U (G) disponibles en el mercado, en donde se puede determinar el mejor modelo de tractor sobre orugas para un trabajo en específico.

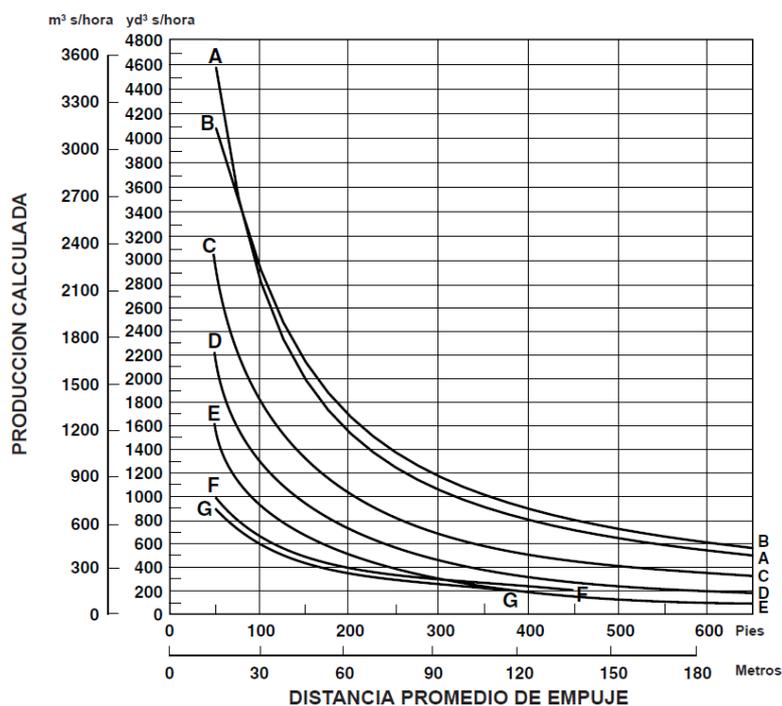


Figura 2.12. Gráfica de producción de las hojas topadoras para tractor sobre oruga.

Fuente: Caterpillar (2000)

### 2.3.1.2. Cargador Frontal

Maquinaria mecánico-hidráulica que posee la capacidad de acarreo de materiales, tanto carguío como mezcla de agregado suelto, corte y excavación eventual.

La aplicación común de este equipo es el carguío de materiales, básicamente para despacho de material preseleccionado y elaborado en plantas de agregados (base, sub-base y otros materiales).



Figura 2.13. Cargador Frontal Caterpillar 966H.

Fuente: Ferreyros (2015)

El modelo recomendado para los trabajos mencionados es el cargador frontal 966H o sus equivalentes en otras marcas ya que tienen una capacidad de balde de 4.00 m<sup>3</sup>, con un peso en operación de aproximadamente 23.70 t, teniendo por ello gran capacidad de producción.

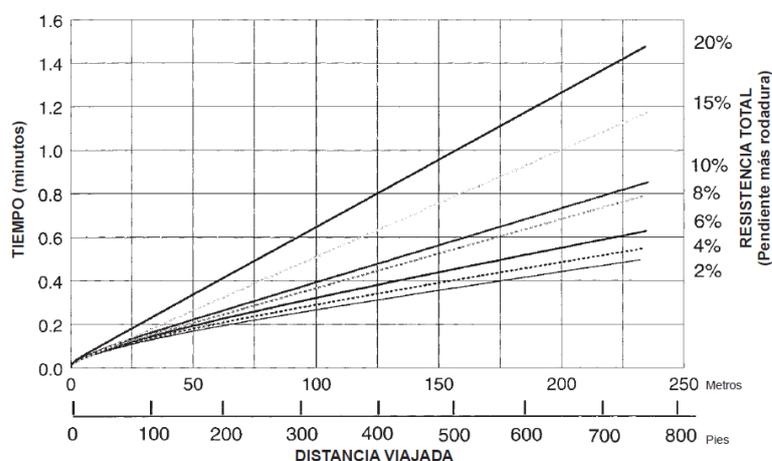


Figura 2.14. Gráfica de tiempo de viaje del cargador frontal Caterpillar 966H - vacío.

Fuente: Caterpillar (2000)

Según las gráficas de producción de acarreo (ver figuras 2.23. y 2.24.), para el modelo 966H en específico se debe emplear en transporte corto máximo de 250 m de cualquier material preseleccionado, dado que a esa distancia se logran ciclos

menores a 1.60 min. con equipo vacío, 2.00 min. con equipo cargado y los menores consumos de combustible.

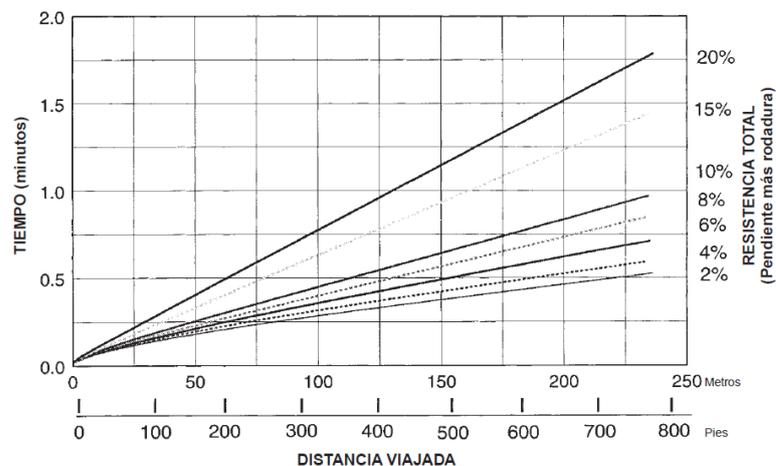


Figura 2.15. Gráfica de tiempo de viaje del cargador frontal Caterpillar 966H - cargado.

Fuente: Caterpillar (2000)

### 2.3.1.3. Excavadora Hidráulica sobre Orugas

Maquinaria mecánico-hidráulica cuya característica principal es la potencia hidráulica, capacidad de rotación de 360° y una alta fuerza de desprendimiento en comparación con otros equipos de movimiento de tierras.

Las características de sus orugas permiten que la excavadora ejerza presiones bajas sobre el terreno, permitiendo que se pueda desplazar sobre materiales blandos.



Figura 2.16. Excavadora sobre orugas Caterpillar 336DL en proceso de corte de material.

Fuente: Elaboración Propia

El tamaño de la excavadora dependerá de la potencia (en HP<sup>5</sup>) del equipo, el volumen de la cuchara puede variar desde 1.10 m<sup>3</sup> en el modelo 320CL hasta los 2.80 m<sup>3</sup> en los modelos más grandes como la 330DL o la 336DL, tener en cuenta que los volúmenes de la cuchara dependerá también de la longitud del brazo, ya que a mayor longitud la carga que soportará será menor.

Tabla 2.5. Modelos de excavadoras sobre orugas.

Modelo	Potencia (HP)	Capacidad del cucharón (m <sup>3</sup> )
320CL	138	1.70
321DL	148	1.70
324DL	188	2.30
325DL	204	2.20
329DL	204	2.00
330DL	268	2.20
336DL	268	2.50

Fuente: Caterpillar (2000)

### 2.3.2. Maquinarias de Transporte

#### 2.3.2.1. Camión Volquete

Los camiones o volquetes sirven para el transporte de diversos materiales, esto gracias a sus altas velocidades al transitar por caminos adecuados; su gran capacidad proporciona costos relativamente bajos (figura 2.26.).



Figura 2.17. Volquete con capacidad de tolva de 17 m<sup>3</sup> en proceso de carga.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>5</sup> HP es la unidad de medida de la potencia utilizada en el sistema inglés (horsepower).

La mayoría de los volquetes pueden operar sobre cualquier tipo de camino suficientemente firme y raso, y su capacidad dependerá también, como en otros equipos, de la potencia que tenga.

En la actualidad existen distintas marcas de volquetes, cada una de ellas diseñadas para realizar el mismo trabajo, pero a la vez cada marca ofrecerá características diferentes.

Existen muchos factores por el cual podemos clasificar a un volquete, número de velocidades, número de ejes, método de descarga, etc. Pero en construcción básicamente nos regimos por la capacidad de carga, número de ejes y potencia.

### 2.3.3. Maquinarias de Conformación

#### 2.3.3.1. Motoniveladora

Maquinaria de conformación especializada para refinar superficies de explanadas y subrasantes en las carreteras. Su función principal es nivelar, modelar o dar la pendiente necesaria al material en el que se trabajará. Se considera como una máquina de terminación superficial.



Figura 2.18. Motoniveladora John Deere<sup>6</sup> (similar al CAT 140K) en proceso perfilado de subrasante.  
Fuente: Elaboración Propia

El equipo presenta tres ejes, la cabina y el motor se encuentran situados en la parte posterior, sobre los dos ejes tractores que son el primer y segundo eje; el

<sup>6</sup> Deere & Company, o conocido también como John Deere, es un fabricante de maquinaria agrícola y de construcción estadounidense fundado en 1837.

tercer eje se localiza en la parte frontal de la máquina, estando localizada la hoja niveladora entre el eje frontal y los dos ejes traseros.

Tabla 2.6. Modelos de motoniveladoras.

Modelo	Potencia (HP)	Ancho de hoja (m)
120K	127	3.70
12K	147	3.70
140K	174	3.70
160K	189	4.30

Fuente: Caterpillar (2000)

El trabajo de la motoniveladora suele complementar al realizado previamente por otros equipos de construcción como excavadoras, tractores, entre otros.

### 2.3.4. Maquinarias de Compactación

#### 2.3.4.1. Rodillo Liso Vibratorio

Los compactadores vibratorios de tambor liso fueron las primeras máquinas utilizadas. Son las más efectivas en materiales granulares con tamaños de partículas que van desde piedras grandes hasta arena fina y arcilla, también son apropiadas para la compactación de rellenos de suelos arenosos y arcillosos.



Figura 2.19. Rodillo liso vibratorio BOMAG<sup>7</sup> BW177 DH-5 (similar al CAT CS64B) en proceso de compactación del afirmado.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>7</sup> Bopparder Maschinenbau-Gesellschaft, también conocido como BOMAG, es una empresa alemana dedicada a la fabricación de equipos de compactación de suelo y asfalto. Fundada en 1957.

Se logra la densidad debido a las fuerzas generadas por la vibración del tambor al impactar el suelo. Los resultados de la compactación son una función de la frecuencia y amplitud de los golpes, así como la fuerza de los golpes y el periodo de tiempo sobre los cuales se aplican los golpes. A continuación, se desarrollará la física de la compactación, tocando a mayor profundidad el trabajo de este tipo de maquinaria, sus tipos y otras características.

## 2.4. FÍSICA DE LA COMPACTACIÓN

### 2.4.1. Introducción

Entender la física de compactar diferentes tipos de suelo, el efecto de las diferentes máquinas y sus capacidades de compactación es la clave para lograr la densidad del suelo de una manera rentable.

### 2.4.2. Factores Influyentes en la Compactación Vibratoria

La compactación vibratoria del suelo es un proceso complejo. Muchos factores diferentes influyen en el trabajo total de compactación. Todos estos factores deben ser considerados en su totalidad, no de forma independiente. Son las características combinadas del compactador y del suelo que se compacta las que determinan el grado de esfuerzo de compactación, y las especificaciones del proyecto determinan si el esfuerzo de compactación es el adecuado.

Los factores o características que influyen en la compactación vibratoria pueden ser divididos en tres categorías, cada una de ellas relacionada con un aspecto en específico del proceso de compactación del material.

#### 2.4.2.1. Características Relacionadas con el Material y la Obra

Con respecto al material y la obra debemos tener en consideración las siguientes características:

- Tipo de Suelo

Un tipo de suelo dado tendrá características de compactación únicas; los suelos que son más difíciles de compactar necesitan compactadores más pesados, el objetivo es encontrar el adecuado para el trabajo a realizar.

- Graduación

La graduación de un material es el rango de tamaños de partículas presentes. Idealmente, hay cantidades relativamente iguales de todos los tamaños de granos sin que exista un tamaño predominante, pero realmente esto último no siempre se cumple.

- Uniformidad

Un material de suelo es una mezcla de muchos tipos de suelos y tamaños de partículas. Se puede pensar que la uniformidad es el grado en el que muchos de los materiales compuestos están bien mezclados y dispersados uniformemente a través del suelo. Una mezcla de suelo uniforme es homogénea y compactará consistentemente; un suelo que no es uniforme mostrará compactación inconsistente.

En mecánica de suelos, el Coeficiente de Uniformidad ( $C_U$ ) es un parámetro que describe la distribución de tamaños de partículas (curva de graduación) de un suelo. Proporciona información sobre cómo están distribuidos los tamaños de las partículas uniformes.

Cálculo del Coeficiente de Uniformidad ( $C_U$ )

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

En donde:

$d_{60}$ : Tamaño o diámetro por debajo del cual queda el 60% del suelo (en peso).

$d_{10}$ : Tamaño o diámetro por debajo del cual queda el 10% del suelo (en peso).

Tabla 2.7. Uniformidad del Suelo.

<b>Uniformidad de Suelos</b>	
En base al Coeficiente de Uniformidad ( $C_U$ )	
$C_U < 5$	Suelo Uniforme
$5 < C_U < 15$	Suelo No Uniforme
$C_U > 15$	Suelo Extremadamente No Uniforme

Fuente: Braja Das (2013)

- Textura

Los tipos de suelo individuales poseen diferentes texturas de superficie, que tienen un efecto en las características de compactación del material. Los tipos de suelo con textura gruesa crean mucha fricción entre las partículas por lo que requieren más energía del compactador para tener una adhesión más suelta. Esto les permite reposicionar en un estado más denso. Las partículas de textura más lisa se pueden deslizar más fácilmente una sobre otra, lo que requiere menos esfuerzo para compactar.

- Forma del grano

Igual que la textura, la forma de las partículas también pueden afectar la compactación del suelo. Las formas irregulares tienden a tener mayor cohesión por fricción que requiere mayor esfuerzo de compactación. Las formas lisas y redondas se deslizan con mayor facilidad y menos esfuerzo de compactación.

- Densidad Inicial

Los materiales con una densidad inicial más alta requerirán menos energía de compactación que los que tienen menor densidad, esto afectará la productividad, ya que el material menos denso tal vez requiera de menos pasadas.

- Contenido de Humedad

La humedad es el factor más importante que se debe considerar al compactar el suelo. La poca cantidad de humedad provocará que las partículas no se adhieran entre sí. Demasiada humedad hará que las partículas se desplacen fácilmente. Todo tipo de suelo tiene un contenido de humedad que es ideal para una compactación óptima según visto en la parte del ensayo Proctor.

#### 2.4.2.2. *Características Relacionadas con las Especificaciones Técnicas del Proyecto*

Con respecto a las especificaciones técnicas del proyecto debemos tener en consideración las siguientes características:

- Objetivo de la Compactación

Normalmente, esto lo establecen los planos y/o documentos técnicos de cada obra. Se especifica como un porcentaje de la máxima densidad de peso seco que resulte del ensayo Proctor estándar o modificado. Como lo demuestran los ensayos de laboratorio y trabajos de campo, entre más alta la meta de compactación, mayor será el número de pasadas que requieran. Siempre es lo más difícil de lograr, los puntos de porcentaje finales de compactación (ver figura 2.29.).

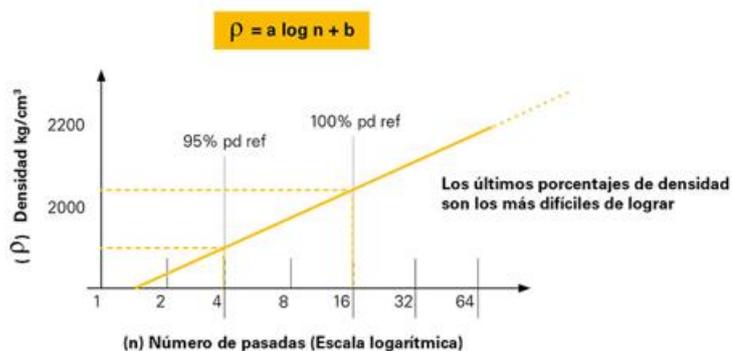


Figura 2.20. Número de pasadas N vs. Densidad máxima seca  $\gamma_d$  para una arcilla limosa.

Fuente: Caterpillar (2013)

- Espesor o grosor de la capa (lift)

Al usar un compactador de tamaño dado, el grosor de la capa va a influenciar la productividad. Una capa más gruesa necesitará más pasadas que una capa delgada.

- Número de pasadas

Esto se refiere al número de veces que un compactador pasará sobre una superficie de suelo. Una pasada se define como un (1) viaje sencillo sobre un área en dirección hacia adentro o de reversa, y al ciclo como dos (2) pasadas consecutivas sobre un área; normalmente una es en una determinada dirección y la otra en reversa.

El saber la cuenta de las pasadas es sumamente fundamental, porque con ello se podrá dimensionar la cantidad y el tipo de compactador que se requiere, como es el objetivo de esta investigación, además porque ayudará a investigar en campo

por qué cierta sección de área no cumple o no llega a la compactación deseada siendo toda el área compactada de manera uniforme.

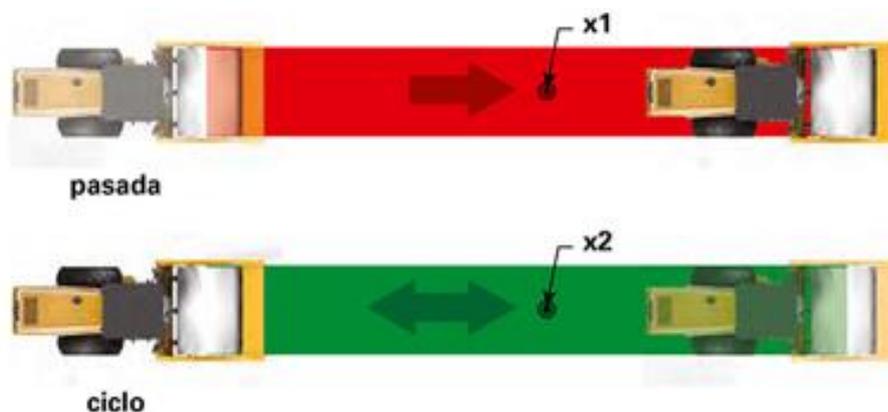


Figura 2.21. Diferencia entre una pasada y un ciclo de compactación.  
Fuente: Caterpillar (2013)

#### 2.4.2.3. Características Relacionadas con la Maquinaria

El diseño de la máquina es importante para la dinámica de la compactación. Factores influenciadores incluyen: Tamaño de chasis, peso total, el ancho del equipo, relación del peso sobre el sistema de vibración y cuánto le aporta al total de la fuerza de compactación. En el mercado existen compactadores de diversos tamaños y formas que veremos a continuación:

- Compactadores Vibratorios

Los compactadores vibratorios funcionan bajo el principio de reordenar las partículas para reducir los vacíos, aumentar la densidad y la resistencia para aguantar la carga. Existen los de tambor liso y de pisones.



Figura 2.22. Rodillos de tambor liso (izquierda) y tambor con pisones (derecha).  
Fuente: Caterpillar (2013)

- Compactadores de Pisón de Cuña

Los compactadores de pisón de cuña son compactadores de alta velocidad, auto propulsados y no vibratorios. Generalmente tienen cuatro ruedas de acero con pisones y están equipados con una hoja topadora.



Figura 2.23. Compactador de Pisón de Cuña.

Fuente: Caterpillar (2013)

- Compactadores Pata de Cabra

Derivan su nombre por la forma de los pisones del tambor compactador, la diferencia entre un compactador de pisones recae en que no vibra, los pisones que posee son mucho más alargados y la punta del pisón es más pequeña. Actualmente este tipo de compactadores tiene más desventajas que ventajas, sobre todo cuando comienza a compactar el material suelto, estos se depositan en todo el rodillo y desuniformizan el material, haciendo que los ciclos de compactación aumenten. Por lo que ha caído en desuso.



Figura 2.24. Compactador Pata de Cabra.

Fuente: Caterpillar (2013)

En el siguiente cuadro se muestran las características de cada tipo de rodillo, consignando la velocidad de trabajo para cada tipo de suelo (no se está considerando la eficiencia en cada tipo de suelo). En este tópico no se considerarán los compactadores neumáticos pues son usados para la compactación de pavimento flexible como la MAC<sup>8</sup>.

Tabla 2.8. Características de los rodillos de compactación.

Tipo		Velocidad de Trabajo (Km/hora)				Espesor de capa a compactar (en cm)
		Roca	Grava	Arena	Arcilla	
Vibratorio	Tambor Liso	1.00 - 2.50	2.00 - 5.00	2.00 - 5.00	1.00 - 2.50	10.00 hasta 50.00
	Tambor de Pisones	1.50 - 2.50	2.00 - 5.00	2.00 - 5.00	0.50 - 1.50	10.00 hasta 50.00
No Vibratorio	Pisón de Cuña	16.00 - 32.00	10.00 -15.00	10.00 -15.00	2.50 - 8.00	20.00 hasta 30.00
	Pata de Cabra	6.00 - 10.00	6.00 - 10.00	5.00- 8.00	No opera	20.00 hasta 25.00

Fuente: Caterpillar (2013)

### 2.4.3. Dinámica de la Compactación Vibratoria

La compactación es el proceso de comprimir un material de un cierto volumen a un volumen menor. Esto se logra al ejercer fuerza y movimiento sobre el área de contacto, causando que las partículas dentro del material rompan sus vínculos de unión física entre sí y se muevan más cerca unos de otros. Veamos primero los tipos de fuerzas para entender la dinámica de compactación vibratoria.

#### 2.4.3.1. Tipos de Fuerzas de Compactación

Los vacíos entre las partículas (aire, agua o una combinación entre ambos) son expulsados por la combinación de fuerza y movimiento.

<sup>8</sup> Mezcla asfáltica en caliente (MAC) o mezcla bituminosa en caliente, es a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante. Producido en condiciones altas de temperatura.

Veamos los cuatro tipos de fuerzas con las que los equipos compactadores trabajan.

- Presión estática

La compactación ocurre cuando la fuerza aplicada tiene origen en el peso del compactador, esta produce esfuerzos cortantes que hacen que las partículas individuales rompan sus vínculos naturales y se reorienten en una posición más estable. Esta fuerza de compactación tiene un mayor efecto en los materiales superficiales y de poca profundidad. Tiene un efecto mínimo en suelos más profundos.

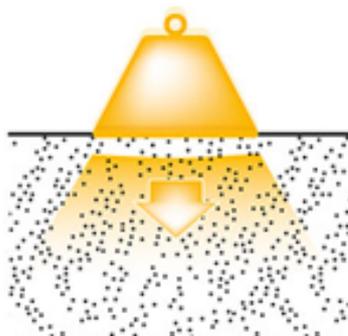


Figura 2.25. Compactación por presión estática.

Fuente: Caterpillar (2013)

En la industria se utiliza el concepto de carga lineal estática para comparar el potencial de compactación de los compactadores estáticos de tambor liso. Es la fuerza vertical directamente debajo del ancho del tambor que crea el esfuerzo cortante para la compactación. Matemáticamente es el peso entre el ancho del tambor y se expresa en kilogramos por centímetro lineal (kg/cm).



Figura 2.26. Carga lineal estática de un rodillo compactador.

Fuente: Caterpillar (2013)

A continuación, se muestra la carga lineal de los diversos compactadores de rodillo liso, pisones y neumáticos disponibles en el mercado.

Tabla 2.9. Carga lineal estática por peso de equipo compactador.

Equipo de compactación	Carga lineal estática (en kg/cm)
Compactadores vibratorios (en toneladas)	
5.00 - 8.00	16.00 - 22.00
8.00 - 12.00	20.00 - 30.00
12.00 - 15.00	30.00 - 45.00
> 15.00	> 45.00
Compactadores de neumático	1000.00 - 3200.00 kg/por rueda

Fuente: Caterpillar (2013)

- Manipulación

Es una fuerza de compactación que reordena las partículas en una masa más densa por medio de un proceso de amasado. La acción longitudinal y transversal de amasado es esencial cuando se compacta suelos muy estratificados, tales como suelos de arcilla. Los compactadores neumáticos de ruedas escalonadas están diseñados para este tipo de compactación.

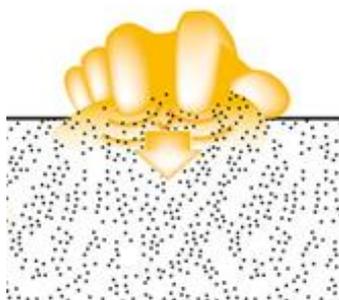


Figura 2.27. Compactación por manipulación.

Fuente: Caterpillar (2013)

- Impacto

El impacto crea una fuerza de compactación mayor a la fuerza gravitacional de una carga estática. Esto porque una masa en movimiento tiene velocidad, la cual es convertida en energía en el momento del impacto. El impacto crea una onda de presión que entra al suelo desde la superficie. Generalmente, los impactos son una serie de golpes. Los golpes de impacto de 50 a 600 golpes por minuto son considerados rangos de baja frecuencia y se usan en martillos de impacto y

pisones manuales. Los golpes de impacto de 1400 a 3000 golpes por minuto son de alta frecuencia y se usan en compactadores vibratorios.

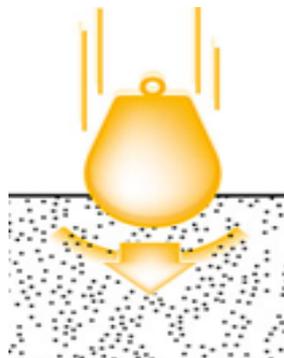


Figura 2.28. Compactación por impacto.

Fuente: Caterpillar (2013)

- Vibración

La vibración es tal vez la fuerza de compactación más compleja y rentable. Más del 90% de los compactadores utilizados en la industria son vibratorios. Esto debido a que los compactadores vibratorios pueden producir a la misma velocidad que un compactador estático que tiene como tres veces más masa.

Los compactadores vibratorios producen una sucesión rápida de ondas de presión que se esparcen en todas las direcciones. Las ondas de presión vibratoria reducen la resistencia al corte entre las partículas del suelo compactado. Cuando se aplica presión, las partículas tienden a reorientarse en un estado más denso (menos vacíos). Para entender cómo funcionan los compactadores vibratorios, es necesario entender la dinámica de compactación vibratoria: amplitud y frecuencia, también el tener en cuenta la carga lineal estática.

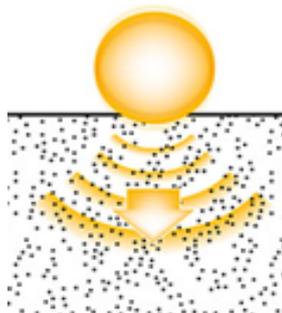


Figura 2.29. Compactación por vibración.

Fuente: Caterpillar (2013)

### 2.4.3.2. Compactación Vibratoria

Veamos los diversos factores que son parte de la compactación vibratoria.

- Amplitud

Es la medida de la distancia de movimiento vertical desde la posición de reposo hasta la posición más alta de un tambor vibratorio, por lo que es correcto afirmar que es la distancia que viaja el tambor hacia adentro de la tierra al desplazarse y compactar el suelo. Al modificar su amplitud, el operador del equipo puede variar la fuerza y el movimiento (aceleración) del tambor en el material.

Cuando el suelo va alcanzando su máxima densidad, llega a un punto donde el suelo no puede absorber la energía de compactación que proporciona el equipo. En ese punto, el operador tiene que optar por trabajar en modo estático.

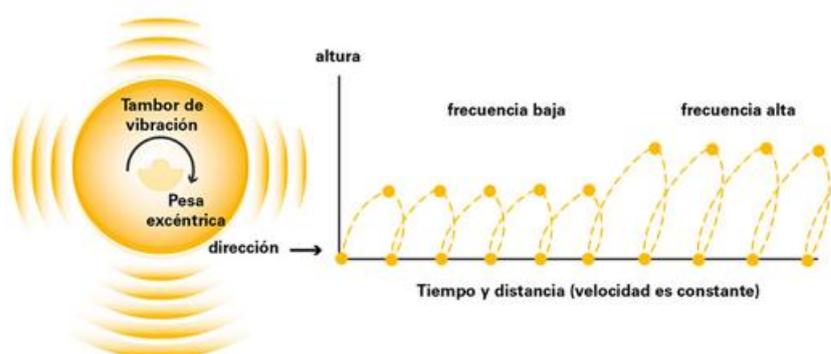


Figura 2.30. Gráfica altura vs. Dirección con amplitud para frecuencia baja y alta.

Fuente: Caterpillar (2013)

- Frecuencia y Velocidad

La frecuencia es una medida del número de ciclos o revoluciones completas de los pesos excéntricos alrededor del eje de rotación durante cierto tiempo. Normalmente, la frecuencia se expresa en unidades de Hertz<sup>9</sup> (Hz). Típicamente las frecuencias van entre 23.00 hasta 35.00. Existe una velocidad y frecuencia óptimas para cada aplicación de compactación.

<sup>9</sup> Hertz, representado por Hz, es la unidad de medida de frecuencia del Sistema Internacional de Unidades. Representa un ciclo por cada segundo, entendiéndose ciclo como la repetición de un suceso. Expresado en unidades básicas es  $s^{-1}$ .

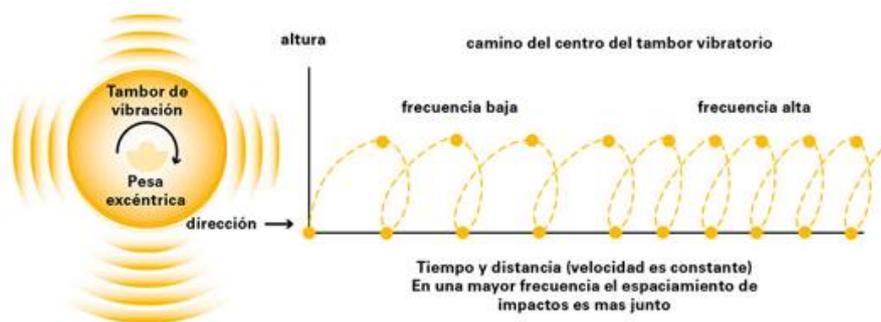


Figura 2.31. Gráfica altura vs. Dirección para frecuencia baja y alta.

Fuente: Caterpillar (2013)

Cuando la frecuencia de las vibraciones aplicadas a un objeto es igual a la frecuencia natural del objeto, el objeto va a vibrar en resonancia. La interacción entre el material que se está compactando y la máquina vibratoria causa que vibre el material y la máquina. Las pesas excéntricas rotando dentro del tambor mantienen esta vibración a una frecuencia igual al  $\text{rpm}^{10}$  del eje de las pesas. En algunas condiciones de la frecuencia dada, la máquina y el material entran en resonancia.

Las condiciones que producen resonancia dependen no solo de las características de la máquina, sino también de la naturaleza del material que se va a compactar y su grado alcanzado de compactación. La frecuencia ideal para lograr una transmisión eficiente de energía de compactación es aproximadamente 15% más alta que la frecuencia resonante.



Figura 2.32. Resonancia trabajando en contra del esfuerzo de compactación (izquierda) y resonancia trabajando en conjunto llamado convergencia armónica (derecha).

Fuente: Caterpillar (2013)

<sup>10</sup> Revoluciones por minuto (rpm), es una unidad de frecuencia que se usa también para expresar velocidad angular. En este contexto, se indica el número de rotaciones completadas cada minuto por un cuerpo que gira alrededor.

- Fuerza centrípeta

Los compactadores vibratorios crean una fuerza centrípeta<sup>11</sup> con una pesa o pesas excéntricas que giran dentro del tambor. La fuerza centrípeta generada por el tambor es análoga al jalón que se siente al columpiar un balde lleno de agua. La masa de las pesas, su distancia de desplazamiento desde el centro de rotación al centro de gravedad y la velocidad de rotación contribuyen a la producción de esta fuerza. La fuerza centrípeta es un cálculo teórico y frecuentemente se usa para calificar la productividad de compactadores vibratorios de suelo.

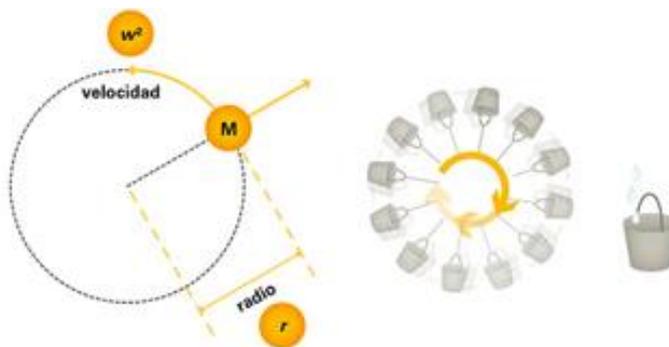


Figura 2.33. Diagrama de cuerpo libre de la pesa excéntrica mostrando la fuerza centrípeta.

Fuente: Caterpillar (2013)

Luego de ver todos estos factores que afectan a la compactación vibratoria podemos formular la fuerza total aplicada  $F_{TA}$  que es considerada como la cantidad máxima de energía vibratoria que un compactador puede aplicar al suelo. Se calcula al agregar la masa estática  $F_S$  de la compactadora a la fuerza centrípeta  $F_C$ .

$$F_{TA} = F_S + F_C$$

En donde

$$F_S = m \cdot g \quad \text{Carga aplicada a tambor estático}$$

$$F_C = 1100 \cdot M \cdot r \left( \frac{N}{1000} \right)^2 \quad \text{Fuerza centrípeta}$$

<sup>11</sup> La fuerza centrípeta es el componente de la fuerza que actúa sobre un objeto en movimiento sobre una trayectoria curvilínea, y que está dirigida hacia el centro de curvatura de la trayectoria. Para calcularla se multiplica la masa (m) de la pesa excéntrica por el radio (r) de rotación y por la velocidad de rotación (frecuencia) al cuadrado ( $w^2$ ).

Siendo:

- M : Masa aplicada por el tambor estático (kg)  
g : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )  
M : Masa del peso excéntrico (kg)  
N : Revoluciones por minuto (rpm)  
r : Momento de excentricidad (m)

#### 2.4.4. Profundidad de la Compactación

Como vemos, muchos factores influyen en la selección del equipo de compactación. El tipo de equipo seleccionado para un proyecto a veces está basado en la experiencia previa del contratista, el tipo de suelo, la especificación del método o el equipo disponible.

La tabla de aplicaciones proporciona directrices para equiparar el equipo con las variables de la obra y los tipos de suelo. No hay ningún compactador que cubra el total de suelos a compactar, cada tipo tiene un material y rango de operación con lo cual es más económico.

Tabla 2.10. Tabla de aplicación de equipo compactador por tipo de suelo.

Equipo compactador	Tipo de suelo a compactar			
	Roca 100%	Arena 100%	Arena 50% - Arcilla 50%	Arcilla 100%
Tambor liso	x	x	x	
Tambor con pisón		x	x	x
Pisón de Cuña			x	x
Pata de Cabra				x
Neumático (no usual)			x	

Fuente: Caterpillar (2013)

Con respecto a los ciclos que necesita el equipo de compactación a elegir, Caterpillar brinda un cuadro en el que, en base a la eficiencia de cada modelo de compactador que ofrece al mercado con el tipo de suelo adecuado, nos muestra el número de pasadas necesario para llegar a una compactación dentro del 95% del Proctor estándar (o 90% del Proctor modificado) hasta el 100% del Proctor estándar (o el 95% del Proctor modificado).

Tabla 2. 11. Número de pasadas del equipo por tipo de suelo a compactar.

Modelo de Compactador	Tambor			Número de pasadas					
	Peso (t)	Ancho (m)	Tipo	Roca		Arena - Grava		Arcilla - Limo	
				95 % Proctor estándar - 90% Proctor modificad	100 % Proctor estándar - 95% Proctor modificad	95 % Proctor estándar - 90% Proctor modificad	100 % Proctor estándar - 95% Proctor modificad	95 % Proctor estándar - 90% Proctor modificad	100 % Proctor estándar - 95% Proctor modificad
CS44B	7.210	1.676	Tambor Liso	9.00	13.00	7.00	10.00		
CS54B	10.555	2.134	Tambor Liso	8.00	12.00	6.00	9.00		
CS56B	11.500	2.134	Tambor Liso	7.00	10.00	5.00	8.00		
CS64B	12.355	2.134	Tambor Liso	6.00	9.00	4.00	7.00	9.00	13.00
CS66B	12.360	2.134	Tambor Liso	5.00	7.00	4.00	6.00	7.00	10.00
CS68B	14.325	2.134	Tambor Liso	4.00	6.00	3.00	5.00	6.00	9.00
CS74B	16.000	2.134	Tambor Liso	4.00	6.00	2.00	3.00	5.00	7.00
CS76B	17.445	2.134	Tambor Liso	4.00	6.00	2.00	3.00	4.00	6.00
CS78B	18.700	2.134	Tambor Liso	3.00	5.00	2.00	3.00	4.00	6.00
CP44B	7.471	1.676	Tambor c/ Pisones					10.00	14.00
CP54B	11.135	2.134	Tambor c/ Pisones					9.00	13.00
CP56B	11.665	2.134	Tambor c/ Pisones					8.00	12.00
CP64B	13.000	2.134	Tambor c/ Pisones					7.00	10.00
CP66B	13.026	2.134	Tambor c/ Pisones					7.00	10.00
CP68B	14.685	2.134	Tambor c/ Pisones					6.00	9.00
CP74B	16.355	2.134	Tambor c/ Pisones					5.00	7.00
CP76B	16.502	2.134	Tambor c/ Pisones					4.00	6.00
CP78B	19.001	2.134	Tambor c/ Pisones					3.00	5.00

Fuente: Adaptado Caterpillar (2013)

La tabla 2.11. considera un espesor de capa de compactación de entre 0.20 a 0.30 metros, compactando en amplitud alta y al llegar a la compactación meta pasar a amplitud baja. La compactación en suelos cohesivos depende considerablemente del contenido de humedad.

Es importante resaltar el hecho de que esta información es un histórico del número de pasadas de cada equipo para un tipo de suelo. Se recomienda siempre, tener un dato más real del número de pasadas, que es obtenido haciendo una prueba de campo con un compactador determinado en el suelo a compactar.

#### 2.4.5. Control de Calidad de la Compactación

La calidad se define como el grado en el que un conjunto de características de un producto o servicio cumple con los requisitos y/o necesidades del cliente conseguido mediante el uso óptimo de recursos (ISO 9000, 2015).

En nuestro caso, llegar a la calidad de lo producido es cumplir con los planos, especificaciones técnicas que demanden para la obra en desarrollo, en específico para esta investigación, cumplir con el grado de compactación demandado.

Para determinar el grado de compactación de un suelo en base a las especificaciones técnicas que demanda la ingeniería del proyecto se trabajan con dos pruebas ampliamente conocidas: prueba del cono de arena y prueba de densímetro nuclear. Siendo, para proyectos de envergadura, el más utilizado el segundo por ser mucho más eficiente, rápido, no destructivo y con un índice de variabilidad reducido frente a su competidor.

##### 2.4.5.1 Prueba del Densímetro Nuclear

El densímetro nuclear nos calcula la densidad *in-situ* de suelos sin destruir el área de ensayo, existen tres maneras de utilizar este equipo: por retro dispersión, colchón de aire y por transmisión directa. El método más usado y el que tocaremos será el de transmisión directa (Berrocal, 2019).

- Transmisión directa

Se obtiene la densidad húmeda del suelo a través de la disminución de la radiación gamma desde una fuente ubicada a no más de 300 mm hacia un detector que

está ubicado en la superficie del suelo. El equipo compara la velocidad a la que viajaron los rayos gamma con datos previamente establecidos durante la calibración para calcularlo los valores de la densidad por unidad de volumen. Luego, para obtener la densidad seca se muestra la masa del agua por unidad del volumen de densidad húmeda.

El equipo también está calibrado para leer el grado de compactación en porcentajes, o sea, la densidad seca obtenida de la radiación entre el valor de densidad seca obtenida en laboratorio. Como se indicó, es usual para proyectos de carreteras y terraplenes una compactación no menor al 95% del Proctor modificado (o 100% del Proctor estándar).

Pasos para la prueba (MTC E 124, 2016):

1. Realizar el agujero con la profundidad deseada a testear. Este debe de ser perpendicular y con el mismo diámetro del vástago (varilla) del densímetro.
2. Retirar la varilla y colocar el equipo en la superficie e introducir el vástago en el agujero hasta la profundidad deseada.
3. Asegurar que el vástago quede completamente en contacto con el suelo, para ello mover suavemente el equipo alrededor del orificio.
4. Colocar el dato del Proctor obtenido en laboratorio para obtener la relación de densidades y el posterior porcentaje de compactación.
5. Leer el grado de compactación, la densidad húmeda, densidad seca y el contenido de humedad *in-situ*.

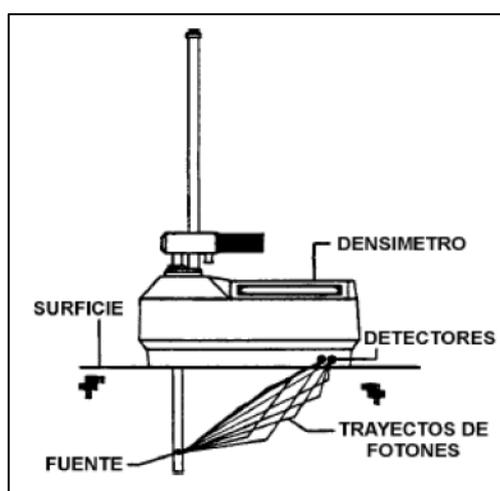


Figura 2.34. Densímetro nuclear para medición por transmisión directa.

Fuente: Berrocal (2019)

Los operadores de este tipo de equipos deben estar capacitados por seguridad y precaución al manejar, porque este es un equipo que contiene fuentes radioactivas de neutrones y rayos gamma que emite una radiación que es perjudicial para la salud. En nuestro país, para operar este equipo es necesario contar con un permiso del Instituto Peruano de Energía Nuclear IPEN, además de todo el equipo de protección personal, el operador debe contar también con un medidor de radiación (dosímetro).

## 2.5. PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL

En ingeniería, se define a los proyectos de infraestructura vial como la planificación para la construcción o mejora de las condiciones de la infraestructura vial de carreteras, donde se evalúa la cantidad de obra que se desarrollará, los efectos en el medio ambiente que tenga consigo y su mitigación, especificaciones técnicas, planos, entre otros. Veamos concepto a concepto de qué trata.

### 2.5.1. Proyectos Civiles

Proyecto es una actividad temporal, con inicio y final definido, para producir un producto, servicio, o resultado, que es único (PMBOK, 2017).

Civil, por su parte, es un adjetivo que refiere a lo perteneciente a los ciudadanos o ciudadanía (RAE, 2019).

Por lo que un proyecto civil se puede definir como la aplicación de conocimientos físicos, químicos, geológicos y de cálculo para la creación de construcciones relacionadas con el transporte, la hidráulica, edificaciones, entre otros.

### 2.5.2. Infraestructura Vial

En el “Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial” se define como una infraestructura vial “a todo camino, arteria, calle o vía férrea, incluidas sus obras complementarias, de carácter rural o urbano de dominio y uso público” (MTC, 2008).

Por lo que la infraestructura vial es el medio a través del cual se le otorga conectividad terrestre al país para el transporte de personas y de carga,

permitiendo realizar actividades productivas, de servicios, de distracción y turísticas.

## 2.6. COSTO Y PRODUCCIÓN DE EQUIPOS DE COMPACTACIÓN

En esta parte se estudiarán las causas que afectan al costo de poseer y operar un equipo de construcción, en especial, a un rodillo compactador; tomando en consideración los siguientes factores: valor de adquisición o costo de compra, número de años de uso y horas empleadas por año, valor de salvataje, costo de posesión o gastos fijos (depreciación, interés del capital invertido, seguros, impuestos y almacenaje) y costos de operación o gastos variables (mantenimiento y reparaciones, combustible, lubricantes, filtros y jornales de trabajo). Estos agentes afectan directamente al costo del alquiler de los equipos (CAPECO, 2018).

### 2.6.1. Costo de Maquinaria de Compactación

Representan la cantidad de dinero invertido para adquirir una maquinaria, realizar un trabajo y mantenerla en buen estado de conservación, con adecuado mantenimiento. El costo total se determina por la siguiente fórmula:

Costo de Maquinaria (CM) = Costo de Posesión (CP) + Costo de Operación (CO)

Revisemos los tres conceptos fundamentales a tener en cuenta para la formulación del costo de maquinaria.

#### 1) Valor de adquisición de la maquinaria $V_{am}$

Precio actual en el mercado, se obtiene de la cotización de los proveedores en ventas de maquinaria. Esta debe incluir varios conceptos como gastos de embarque, impuestos, flete y desembarque en el puerto del Callao entre otros.

#### 2) Vida económica útil $V_e$

Periodo que el equipo trabaja con un rendimiento económicamente justificable, produciendo ingresos al propietario en condiciones adecuadas de operación y mantenimiento.

Se considera que un año equivale a 2000 horas de trabajo de maquinarias pesadas (un año de 10 meses, un mes de 25 días y un día de 8 horas).

Según (Ramos, 2012), se puede asumir que la vida económica útil del rodillo compactador autopropulsado es de 5 años, que equivale a 10,000 horas ( $N = 5$  años,  $V_e = 10,000$  horas).

### 3) Valor de salvataje $V_s$

Llamado también valor de rescate, se define como el valor de reventa que tendrá la maquinaria al final de su vida útil.

Es usual considerar que el valor de salvataje fluctúa entre 20 – 25% del valor de adquisición del valor de adquisición para maquinarias pesadas. Para efectos de esta tesis se considerará al valor de salvataje con el valor de 25% de  $V_{am}$ .

Definidos los valores, estudiemos los costos de posesión y operación.

#### 2.6.1.1. Costos de posesión o gastos fijos

Representa una inversión permanente e independiente al trabajo que realice la maquinaria. Los gastos fijos corresponden a la depreciación, interés de capital invertido, seguros y gastos de almacenaje; estos factores afectan al propietario de la maquinaria durante el tiempo de posesión por ser inherentes a la inversión del capital. Veamos:

- Depreciación  $D$

Costo que resulta de la disminución del valor original de la maquinaria debido al uso, esto durante el tiempo de su vida económica. La fórmula de la depreciación es la siguiente:

$$D = \frac{V_{am} - V_s}{V_e}$$

En donde:

$D$  = Depreciación por horas de trabajo

$V_{am}$  = Valor de adquisición de maquinaria

$V_s$  = Valor de salvataje o de rescate

$V_e$  = Vida económica del equipo expresada en horas efectivas de trabajo

- Interés de capital invertido I

Este rubro se refiere a los intereses correspondientes al capital invertido en la maquinaria. La fórmula genérica para el cálculo de este costo es:

$$I = \frac{\frac{(N + 1)}{2N} \cdot N \cdot V_{am} \cdot i}{V_e}$$

Donde:

I = Interés horario de inversión de capital invertido

N = Vida económica útil en años

$V_{am}$  = Valor de adquisición de maquinaria

i = Vida económica del equipo expresada en horas efectivas de trabajo

Si:

$$K_a = \frac{\frac{(N + 1)}{2N} \cdot N}{V_e}$$

Entonces:

$$I = K_a \cdot V_{am} \cdot i$$

A continuación, presentamos los valores de “ $K_a$ ” para diferentes periodos de vida económica, de acuerdo a la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Valores para los factores  $K_a$ .

VIDA EN AÑOS	VIDA EN HORAS	FACTOR $K_a$
2.0	3000	0.0005000
3.0	3000	0.0006667
4.0	8000	0.0003125
5.0	10000	0.0003000
6.0	12000	0.0002917
7.0	8000	0.0005000
7.5	15000	0.0002833
8.0	16000	0.0002813
9.0	12500	0.0004000

Fuente: Ramos (2012)

- Seguros, almacenaje y otros  $P_s, A$

Esto es debido a la permanencia del equipo en talleres o estacionamientos, cuando está inactivo o en actividad, este costo es del orden del 1.5% y al tipo de seguro que para los fines de esta tesis será del 3.5% tomando como base el TREC (Todo Riesgo Equipo Contratista). Sumando los conceptos expuestos obtenemos el 5%. Para el cálculo del gasto por seguros y almacenaje se aplicará la siguiente fórmula:

$$S, A = K_a \cdot V_{am} \cdot (P_s + Alm)$$

$$S, A = (0.05)K_a \cdot V_{am}$$

Donde:

$S, A$  = Costo por seguro, almacenaje por hora de trabajo

$P_s$  = Prima anual promedio (TREC)

$Alm$  = Porcentaje estimado por concepto de almacenaje

$K_a$  = Factor presentado en la Tabla N° 2.12.

$V_{am}$  = Valor de adquisición de maquinaria

#### 2.6.1.2. Costos de operación o gastos variables

Son costos que se originan del uso de las maquinarias: los mantenimientos, combustibles, lubricantes, filtros, neumáticos y costos de hora-hombre. Veamos:

- Mantenimiento y reparación

Se considera como gastos de mantenimiento a los originados para mantener a la maquinaria en buenas condiciones durante su vida económica; el costo de reparación es aquel que incluye el valor de la mano de obra de los mecánicos y de los repuestos necesarios para mantener al equipo en operación. Para el cálculo del gasto variable se aplicará la siguiente fórmula:

$$MR = \%MR \cdot \frac{V_{am}}{V_e}$$

Donde:

$MR$  = Gastos de mantenimiento y reparación horaria

$\%MR$  = Porcentaje de mantenimiento y reparación estimado (Tabla 2.13.)

$V_{am}$  = Valor de adquisición de maquinaria

$V_e$  = Vida económica de la maquinaria expresada en horas de trabajo

Tabla 2.13. Porcentajes de mantenimiento y reparación.

MAQUINARIA	%MR
Rodillo vibratorio autopropulsado	75
Rodillo vibratorio de tiro	50
Rodillo neumático	50
Rodillo tándem estático y vibratorio autopropulsado	75
Zarandas	65
Volquetes	50

Fuente: Ramos (2012)

- Combustible

La cantidad y calidad del combustible variará de acuerdo a las características del equipo en donde se utilizará.

Se tiene un promedio histórico de uso de combustible para los equipos de compactación siguientes:

Tabla 2.14. Consumo de combustible, lubricantes y grasas, según tipo de equipo compactador.

DESCRIPCIÓN	Potencia HP	Capacidad toneladas	Combustible G/h	Lubricantes G/h	Grasas Lb/h
<b>EQUIPO DE COMPACTACIÓN</b>					
Rodillo liso vibratorio autopropulsado	70-100	7.00 - 9.00	2.66	0.09	0.05
Rodillo liso vibratorio autopropulsado	101-135	10.00 - 12.00	3.60	0.13	0.06
Rodillo liso vibratorio autopropulsado	136-170	15.00 - 17.00	4.53	0.15	0.07
Rodillo liso vibratorio autopropulsado	210	19.00 - 23.00	5.59	0.20	0.10

Fuente: Ramos (2012)

- Lubricantes

Es el consumo de aceite de motor, transmisión y grasas. Relacionado con la capacidad de la máquina, se toma un promedio que figura en la tabla 2.14.

- Filtros

El costo por este concepto se puede estimar en un 20% del costo total de lubricantes y combustible. Se calcula en base al periodo de vida recomendado por el fabricante para cada tipo de filtro

- Llantas

La vida útil de las llantas de una maquinaria de compactación depende del mantenimiento, curvatura de la vía, pendiente, velocidad, presión de inflado, etc. En el siguiente cuadro veremos cuantas horas en promedio duran las llantas de los compactadores.

Tabla 2.15. Vida útil de neumáticos.

DESCRIPCIÓN	VIDA ÚTIL (Horas)
<b>EQUIPO DE COMPACTACIÓN</b>	
Rodillo liso vibratorio autopropulsado	4000
Rodillo neumático autopropulsado	4000

Fuente: Ramos (2012)

- Costo de hora-hombre de operadores y mecánicos

Representa la remuneración del personal encargado de la operación de la maquinaria y su mantenimiento. Este costo de hora-hombre (hh) se presenta en el Anexo N° 02 y debido a la fecha de aplicación de esta tesis se ha basado en la normativa vigente al 31 de setiembre del 2017 para los trabajadores de construcción civil del Perú.

Por todo expuesto, la tarifa de alquiler de maquinaria o equipo de construcción a calcular se encuentra formulada por los costos de posesión y gastos fijos, y los costos de operación o gastos variables contenidos en la expresión:

$$\begin{aligned}
 CM &= \underbrace{\text{COSTO DE POSESIÓN}} + \underbrace{\text{COSTOS DE OPERACIÓN}} \\
 CM &= (D + I + S + A) + (MR + Co + L + F + LL + OP)
 \end{aligned}$$

Donde:

- CM = Costo total de tarifa de maquinaria
- D = Depreciación
- I = Interés de capital invertido en la máquina
- S = Seguros para riesgos de maquinaria en operación
- A = Gastos de almacenaje y cuidado cuando se encuentra inactiva
- MR = Gastos de mantenimiento y reparación
- Co = Combustibles
- L = Lubricantes
- F = Filtros

### 2.6.2. Producción de Maquinaria de Compactación

Según (Lloret, 2009), la producción del equipo o velocidad de producción de compactación depende del ancho efectivo de los rodillos, del tipo de suelo, de la velocidad de trabajo de la máquina, del número de pasadas necesario para obtener la densidad específica del espesor de capa, entre otros.

La producción de compactación (en metros cúbicos compactados por hora o m<sup>3</sup>/h, notar que en toda la tesis cuando se refiere a volumen de compactación, este siempre debe ser entendido como volumen compactado, es decir, como acabado final) se puede representar con la siguiente expresión:

$$r_c = \frac{W \cdot V \cdot e \cdot E}{N \cdot (1 + h)}$$

Donde:

- $r_c$  = Producción o velocidad de compactación (m<sup>3</sup>/hm o m<sup>3</sup>/hora- máquina)
- W = Ancho efectivo de compactación (m)
- V = Velocidad de operación (m/hm o m/hora-máquina)
- e = Espesor de la capa de compactación (m)
- E = Factor de eficiencia de trabajo (factor adimensional)
- N = Número de pasadas (factor adimensional)
- h = Factor de altura (factor adimensional)

- Ancho efectivo de compactación  $W$

Resulta de la resta entre el ancho del tambor del rodillo y el traslape  $L_o$ . Actualmente y debido a que los compactadores poseen un sistema inteligente de compactación este valor de traslape fluctúa entre 0.10 - 0.20 metros. Para los cálculos a realizar se considerará un valor de 0.15 metros de traslape.

- Velocidad de operación  $V$

Es la velocidad con la que opera el rodillo compactador en la zona de suelo a compactar. Para esta investigación se ha considerado una velocidad de operación promedio observado en campo de 2.50 km/hm o 2500 m/hm.

- Espesor de capa de compactación  $e$

El espesor de compactación se determina a partir de las especificaciones técnicas que rigen la obra, o de acuerdo a los resultados de la prueba de laboratorio. Para esta investigación, se tomará un espesor de 0.20 – 0.30 m debido a que es el espesor máximo exigido en todos los proyectos de carretera, es decir, en donde cada capa será controlada (se tomará prueba de densímetro nuclear). Para el espesor de capas de presas, varían entre 0.30 – 0.50 m.

- Factor de eficiencia de trabajo  $E$

Resulta de la evaluación combinada de los factores correspondientes al aprovechamiento del tiempo  $t$ , a la habilidad del operador  $o$  y a las condiciones de campo.

Tabla 2.16. Factor de eficiencia de trabajo  $E$ .

CONDICIONES DE TRABAJO	$t$	$o$	$E$
Excelentes	60/60	1.0	1.00
Buenas	50/60	0.9	0.75
Regulares	45/60	0.8	0.60
Deficientes	40/60	0.7	0.47

Fuente: Caterpillar (2013)

- Numero de pasadas N

Es la cantidad de pasadas del equipo compactador sobre la superficie de ejecución con el fin de obtener la densidad adecuada, la que indica los planos o las especificaciones técnicas del proyecto. Para fines de esta investigación se considerará la tabla 2.11. para proyectar cuando no se posea la prueba de campo.

- Factor de altura h

La altura del terreno sobre el nivel del mar tiene influencia sobre la potencia de los motores. Cuando una maquinaria funciona a grandes altitudes, la potencia disminuye debido a la disminución de la densidad del aire en el medio ambiente.

La maquinaria consigue desarrollar el 100% de su potencia en una altura de hasta 1'000 m.s.n.m.; a partir de esa altitud se presenta un porcentaje de pérdida de potencia equivalente al 1% cada 100 metros de altura.

$$h = \frac{\text{Altura sobre el nivel del mar (m)} - 1\,000\text{ (m)}}{10\,000\text{ (m)}}$$

## 2.7. GESTIÓN DEL VALOR GANADO

Según el (PMBOK, 2017) es la metodología que combina medidas de alcance, cronograma y recursos para evaluar el desempeño, avance y conclusión del proyecto. La Gestión del Valor Ganado (EVM<sup>12</sup> por sus siglas en inglés) compara línea base de desempeño con respecto al desempeño real. Para ejecutarlo se utilizan los siguientes conceptos:

- Valor Planificado PV<sup>13</sup>

Es el presupuesto autorizado que se ha asignado al trabajo programado con la finalidad de culminar una actividad o un componente de la Estructura de Desglose de Trabajo EDT. Se define como:

---

<sup>12</sup> Earned Value Management por sus siglas en inglés.

<sup>13</sup> Planned Value por sus siglas en inglés.

$$PV = \sum (\text{Metrado Planificado} \times \text{Costo Unitario Planificado})$$

Donde:

Valor Planificado : Expresado en “Unidad Costo”

Metrado Planificado : Expresado en “Unidad Producción”

Costo Unitario Planificado : Expresado en “Unidad Costo / Unidad Producción”

El Valor Planificado Total se le denomina Presupuesto hasta la Conclusión BAC<sup>14</sup>. En esta investigación, se usará el término BAC para referirnos al presupuesto de la obra sin ser optimizada por el software a desarrollar a fin de mostrar los costos ahorrados luego del planeamiento de obra en los frentes de trabajo.

- Valor Ganado EV<sup>15</sup>

Es la medida del trabajo realizado expresado en términos de presupuesto autorizado para dicho trabajo. En otras palabras, es el presupuesto asociado con el trabajo autorizado completado y entregado. Se define como:

$$EV = \sum (\text{Metrado Ejecutado} \times \text{Costo Unitario Planificado})$$

En donde:

Valor Ganado : Expresado en “Unidad Costo”

Metrado Ejecutado : Expresado en “Unidad Producción”

Costo Unitario Planificado : Expresado en “Unidad Costo / Unidad Producción”

- Costo Real AC<sup>16</sup>

Es el costo incurrido por el trabajo llevado a cabo en una actividad durante un período de tiempo específico. Es el costo total en el que se ha incurrido para llevar a cabo el trabajo medido por el Valor Ganado EV. Se define como:

$$AC = \sum (\text{Metrado Ejecutado} \times \text{Costo Unitario Real})$$

En donde:

Costo Real : Expresado en “Unidad Costo”

<sup>14</sup> Budget at Completion por sus siglas en inglés.

<sup>15</sup> Earned Value por sus siglas en inglés.

<sup>16</sup> Actual Cost por sus siglas en inglés.

Metrado Ejecutado : Expresado en “Unidad Producción”  
Costo Unitario Real : Expresado en “Unidad Costo / Unidad Producción”

A continuación, se presentan las variaciones e indicadores para medir el desempeño del cronograma del proyecto:

- Variación del Cronograma SV<sup>17</sup>

Monto por el cual el proyecto está adelantado o retrasado en relación con la fecha de entrega planificada, en un momento determinado. Se determina como:

$$SV = Valor Ganado EV - Valor Planificado PV$$

- Índice de Desempeño del Cronograma SPI<sup>18</sup>

Es una medida de eficiencia del cronograma, en concreto, el trabajo de todo el proyecto, pero se debe analizar también el desempeño de la ruta crítica, para determinar si el proyecto está adelantado o atrasado. Se determina como:

$$SPI = \frac{Valor Ganado EV}{Valor Planificado PV}$$

Ahora veamos las variaciones e indicadores para medir el desempeño en costo del proyecto:

- Variación del Costo CV<sup>19</sup>

Monto del déficit o superávit presupuestario en un momento dado. Se determina como:

$$CV = Valor Ganado EV - Costo Real AC$$

---

<sup>17</sup> Schedule Variance por sus siglas en inglés.

<sup>18</sup> Schedule Performance Index por sus siglas en inglés.

<sup>19</sup> Cost Variance por sus siglas en inglés.

- Índice de Desempeño del Costo CPI<sup>20</sup>

Medida de eficiencia del costo de los recursos presupuestados. Dado que la Gestión del Valor Ganado tiene un enfoque basado en costos, el CPI es el indicador más crítico. Se determina como:

$$CPI = \frac{\text{Valor Ganado } EV}{\text{Costo Real } AC}$$

En la tabla 2.17. se interpretan los resultados de relaciones estudiadas.

Tabla 2.17. Interpretación de las variaciones e índices de costo y cronograma.

		RESULTADO	IMPLICANCIA	INTERPRETACIÓN
Variación	Cronograma SV = EV - PV	Positivo (SV > 0)	EV > PV	Proyecto adelantado
		Neutro (SV = 0)	EV = PV	Proyecto a tiempo
		Negativo (SV < 0)	EV < PV	Proyecto atrasado
	Costo CV = EV - AC	Positivo (CV > 0)	EV > AC	Debajo del costo planificado
		Neutro (CV = 0)	EV = AC	En el costo planificado
		Negativo (CV < 0)	EV < AC	Encima del costo planificado
Índice	Cronograma SPI = EV / PV	SPI > 1	EV > PV	Proyecto adelantado
		SPI = 1	EV = PV	Proyecto a tiempo
		SPI < 1	EV < PV	Proyecto atrasado
	Costo CPI = EV / AC	CPI > 1	EV > AC	Debajo del costo planificado
		CPI = 1	EV = AC	En el costo planificado
		CPI < 1	EV < AC	Encima del costo planificado

Fuente: Adaptado PMBOK (2017)

Por último, veamos los valores de pronóstico en costo del proyecto:

- Estimado a la Conclusión EAC<sup>21</sup>

Es el pronóstico del costo final, comparado con el presupuesto planeado en obra o el presupuesto inicial o base. Se determina como:

$$EAC = \text{Costo Real } AC + \text{Nuevo estimado para trabajo remanente y/o faltante}$$

<sup>20</sup> Cost Performance Index por sus siglas en inglés.

<sup>21</sup> Estimate at Completion por sus siglas en inglés.

- Variación a la Conclusión VAC<sup>22</sup>

Monto que falta para poder concluir el proyecto, comparado con el Presupuesto hasta la Conclusión BAC. Se determina como:

$$VAC = \text{Presupuesto hasta la Conclusión BAC} - \text{Estimado a la Conclusión EAC}$$

En la figura 2.44. se observa los conceptos revisados plasmados en la curva "S" de costo del proyecto materia de estudio.

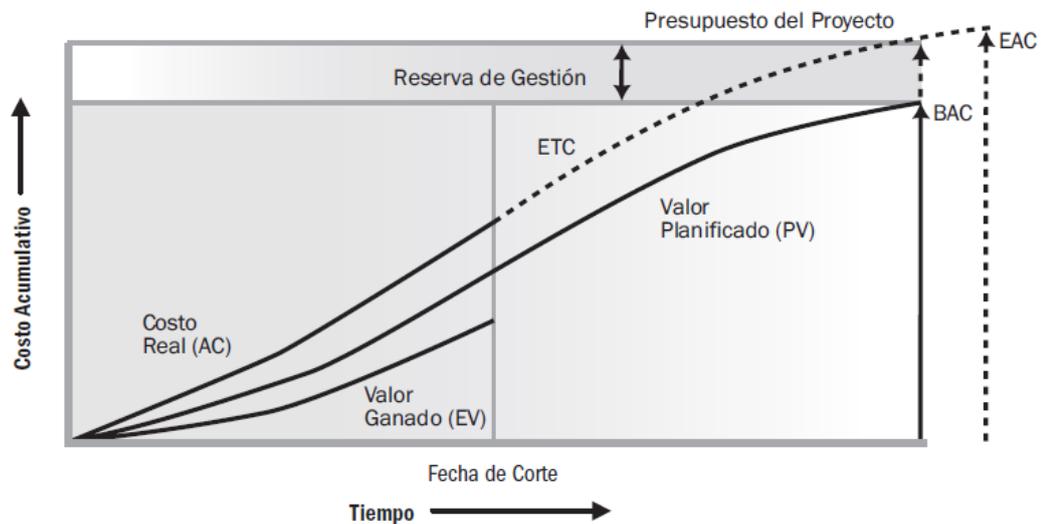


Figura 2.35. Curva "S" del Valor Ganado EV, Valor Planificado PV y Costos Reales AC.  
Fuente: PMBOK (2017)

<sup>22</sup> Variance at Completion por sus siglas en inglés.

## CAPÍTULO III: MODELAMIENTO MATEMÁTICO

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Un problema de optimización de costos de producción responde a la pregunta fundamental de cómo seleccionar factores de producción con el fin de producir bienes con un costo mínimo.

La finalidad de este capítulo es plantear el problema de programación lineal que encontrará el costo mínimo de producción y luego resolverlo, consiguiendo con ello el costo mínimo en la producción.

### 3.2. MODELO DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN

El problema de optimización en los costos de alquiler de los equipos de compactación a aplicar en este trabajo es el de minimizar el costo de la producción. El objetivo que persigue conseguir es que, frente a una cierta cantidad de producción, tenemos varias combinaciones posibles de flotas de equipos de maquinaria para lograrlo, pero solo una óptima que minimice los costos.

Existen diversos tipos de maquinarias de compactación, cada uno representado por una variable  $x_n$ , el costo horario asociado a cada uno de ellos  $c_n$ , la velocidad de producción del equipo por tipo de suelo  $r_n$ , las condiciones de espacio<sup>23</sup> que estos equipos requieren para realizar la producción  $a_n$ . A estas condiciones del problema se le añaden los intrínsecos<sup>24</sup> a las del proyecto en específico, tales como el tipo de suelo  $S$ , el volumen de suelo a compactar  $mcc$ , la superficie total de proyecto en donde se realizará la compactación por capas  $A$  y el plazo de ejecución del trabajo  $T$ .

El objetivo del modelo es minimizar el costo de producción del volumen a compactar, al mismo tiempo que se satisfacen las restricciones de geometría y las intrínsecas al proyecto.

<sup>23</sup> Condiciones de espacio relacionadas con el área de trabajo total en donde se desarrollará la actividad, está condicionada por factores como movilidad y distancias mínimas de seguridad en obra.

<sup>24</sup> Intrínseco o propio de las condiciones del proyecto, extraídos de las especificaciones técnicas, planos y memoria descriptiva de la obra.

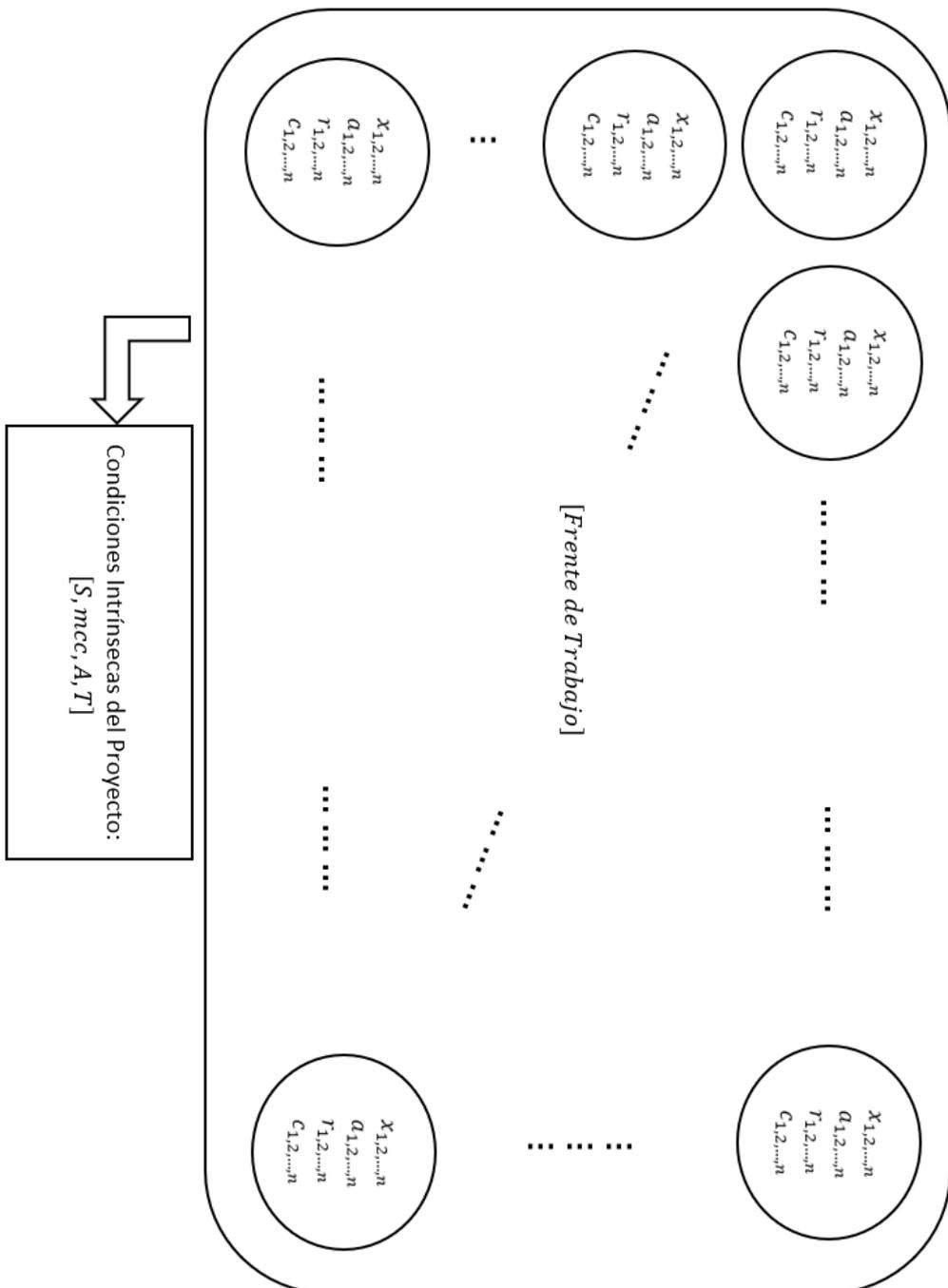


Figura 3.1. Representación del modelo del problema de optimización de maquinarias de compactación.  
 Fuente: Elaboración Propia

Como se indica en el modelo, cada maquinaria de compactación tiene características definidas con respecto al tipo, área de trabajo y velocidad de producción que a su vez se combinan con las condiciones intrínsecas del proyecto, veamos:

### 3.2.1. Respecto al Costo de los Equipos de Compactación

En el caso de los proyectos de construcción en el Perú, según el (MTC, 2013) en el “Manual de carreteras: especificaciones técnicas generales para construcción”, recomienda controlar el costo de alquiler de un equipo de construcción con la unidad de medida (USD/h), siendo USD la denominación del dólar americano y  $h$  las horas de trabajo en general.

La función del costo de compactación, está compuesta por el producto del costo unitario de alquiler del equipo  $c_{1,2,\dots,n}$  (USD/hm o USD/hora-máquina) y la cantidad de maquinaria ofertada de un tipo, o modelo de equipo  $x_{1,2,\dots,n}$  (m o máquina), expresada de la siguiente manera:

$$f_{compact} = c_{1,2,\dots,n} \cdot x_{1,2,\dots,n} \quad (\text{USD/h})$$

Además, el costo total del proceso de compactación (en USD) es igual a la multiplicación de la función del costo por el tiempo de trabajo o ejecución de la partida de compactación  $T$  luego de transformarse de días a horas.

La función detallada arriba nos servirá para elaborar la función objetivo del problema de optimización.

### 3.2.2. Respecto a la Productividad de los Equipos de Compactación

Como se ha desarrollado en la parte teórica, cada equipo de compactación  $x_{1,2,\dots,n}$  (m o máquina) posee un desempeño que depende del tipo de suelo  $S$ , por lo que la velocidad de producción  $r_{1,2,\dots,n}$  (m<sup>3</sup>/hm o m<sup>3</sup>/hora-máquina) será diferente en cada suelo.

Por otro lado, se requiere el volumen o la cantidad de relleno a compactar  $mcc$  (m<sup>3</sup>) a fin de combinarlo con el tiempo de trabajo, pero este tiempo es el tiempo con el que se dispone  $T$  (días), el número de jornadas  $J$  (jornadas/día) y también

por el tiempo efectivo de trabajo de un equipo  $h_e$  por jornada (h/jornada u horas/jornada) en el proyecto en específico. Este tiempo efectivo se determina realizando un estudio de medida de la productividad, el más usado en la industria es la Carta Balance CB, que consiste en cuantificar las horas que realmente trabaja un equipo de construcción, una cuadrilla de obreros entre otros. Usualmente, para proyectos de carretera, los equipos de compactación trabajan entre un 55-70% de horas con respecto a la jornada laboral diaria. Con ello, podemos encontrar la demanda de producción por hora  $R$  (m<sup>3</sup>/h) de la obra.

### 3.2.3. Respecto a las Características Geométricas del Frente de Trabajo

La producción que realizan los equipos de compactación está relacionada con el espacio que disponen para la ejecución del proceso de compactado. Cada equipo, debido a sus dimensiones y a la distancia que debe existir entre un equipo de compactación a otro, por razones de seguridad, se le definirá como área de trabajo del equipo  $a_{1,2,\dots,n}$  (ver figura 3.2.).

Ahora bien, se debe entender este espacio como el área mínima necesaria que requiere el equipo para cumplir con su respectiva velocidad de producción, cumpliendo con los estándares de seguridad en obra, luego de satisfacer dicha condición, el volumen de producción será el mismo sin importar el área que posea para compactar, garantizando su área individual, la producción del equipo se mantiene constante<sup>25</sup>.

La norma G-050 indica que se debe tener una distancia prudencial entre equipos de movimiento de tierras, pero no indica una distancia mínima. Mientras que, en los proyectos mineros, el “Manual de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente” (SMI-Fluor, 2018) en la tabla 3.1. indica que la separación entre equipos de compactación no debe ser menor de 10.00 m, esto por distancias operativas, velocidad de operación y punto ciego del operador de la maquinaria.

---

<sup>25</sup> Si el equipo tiene una menor área de trabajo, mayor será el número de capas que compactará, y mientras mayor sea el área, entonces menor será el número de capas. En todos los casos el volumen compactado final y la velocidad de producción serán constantes.

Tabla 3.1. Separación de equipos de construcción.

Maquinaria	Velocidad de operación promedio (km/h)	Radio de giro (m)	Separación entre equipos (m)
Excavadora	1.80	20.00	40.00
RockDrill	1.50	20.00	30.00
Retroexcavadora	7.20	10.00	20.00
Compactadores	4.50	6.00	10.00
Motoniveladora	10.00	10.00	30.00

Fuente: Adaptado del manual de SSOMA-SMI-FLUOR (2018)

La figura 3.2. grafica las dimensiones del equipo compactador, también la distancia lateral (en la dirección del ancho del equipo) y la distancia frontal (en la dirección del largo del equipo). Tomando dos equipos, cada uno absorbe la mitad de la distancia exigida, es decir, 05 m; con esto se garantiza que la distancia mínima entre equipos en movimiento sea de 10.00 m.

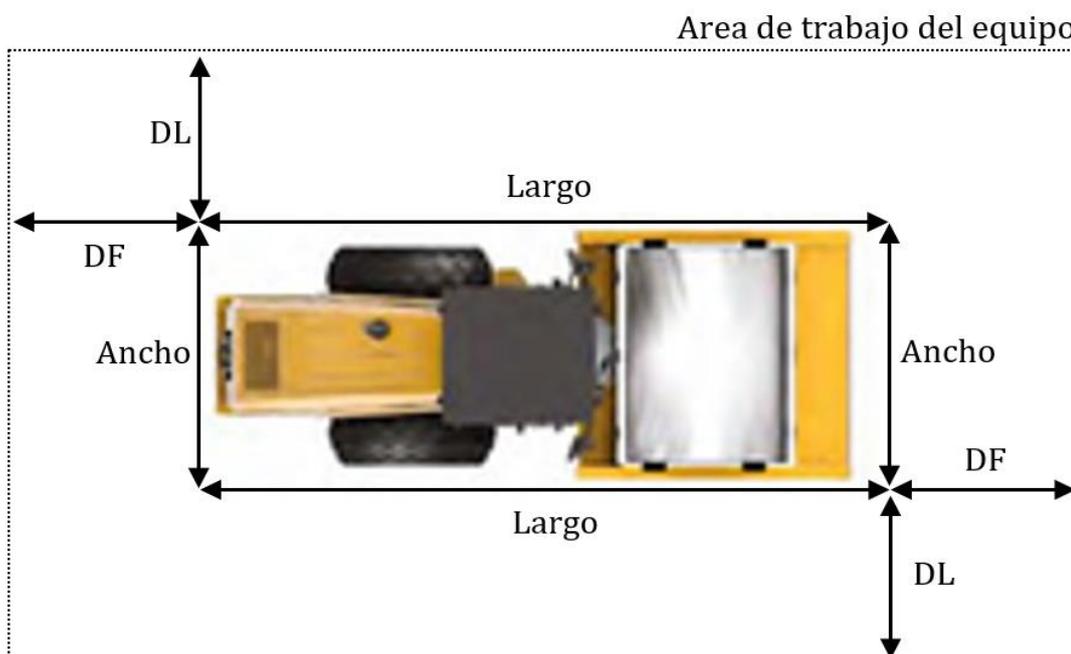


Figura 3.2. Distancia Lateral (DL) y Distancia Frontal (DF) del equipo de compactación.

Fuente: Elaboración Propia

Establecidas las distancias se procede a determinar el área de trabajo para cada equipo compactador (ver tabla 3.2.).

Tabla 3.2. Determinación del área de trabajo del equipo compactador.

Modelo	Ancho (m)	Largo (m)	Distancia Lateral (m)	Distancia Frontal (m)	Área de trabajo del equipo <i>a</i> (m <sup>2</sup> /hm)
CS44B / CP44B	1.68	5.09	5.00	5.00	177.00
CS54B / CP54B	2.13	5.85	5.00	5.00	193.00
CS56B / CP56B	2.13	5.86	5.00	5.00	193.00
CS64B / CP64B	2.13	5.86	5.00	5.00	193.00
CS66B / CP66B	2.13	5.86	5.00	5.00	193.00
CS68B / CP68B	2.13	6.05	5.00	5.00	195.00
CS74B / CP74B	2.13	6.05	5.00	5.00	195.00
CS76B / CP76B	2.13	6.13	5.00	5.00	196.00
CS78B / CP78B	2.13	6.13	5.00	5.00	196.00

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.2.4. Modelo Final

La finalidad del modelo es disminuir el costo de alquiler de los equipos de compactación. Dicho costo guarda relación con la velocidad de producción de los equipos a seleccionar y la superficie en donde estos equipos trabajarán.

Existe una proporcionalidad (directa e inversa) entre el costo total del proceso de compactación y la función del costo de compactación, con la productividad de los equipos de compactación y con las características geométricas del frente de trabajo; de acuerdo a tres aspectos fundamentales:

- 1) Para disminuir el costo total del proceso de compactación (USD), se debe aumentar la velocidad de producción (m<sup>3</sup>/hm), pues a mayor producción por hora máquina, se logrará un menor tiempo de alquiler de dicho equipo.
- 2) De lo anterior se obtiene que el costo total del proceso de compactación (USD) guarda una relación inversamente proporcional a la velocidad de producción (m<sup>3</sup>/hm).
- 3) Se aprecia además que mientras se tenga mayor área de compactación (m<sup>2</sup>) se podrá disponer de mayores equipos (m o maquinaria) para realizar el trabajo, sobre todo si se posee un plazo corto de tiempo (días) de ejecución, de no ser un área mayor se tendría que alquilar equipos con mayor capacidad de compactación por lo que elevaría el costo total del proceso de compactación (USD).

Por lo tanto, el objetivo verbal es minimizar la función del costo de compactación  $f_{compact}$  (USD/h). Definamos ahora los elementos del problema de optimización:

- Variables de decisión

Las variables de decisión  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) representan la cantidad y tipo (o modelo) de maquinaria utilizada en el proceso de compactación, estas variables de decisión deben ser no negativas.

- Función objetivo

Sea  $Z$  la función objetivo,  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) el costo unitario de alquiler de equipo y  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) la maquinaria ofertada.

La función objetivo del problema está representado por:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i^n c_i x_i,$$

- Restricciones

Las inecuaciones que limitan los valores admisibles de las variables de decisión son las siguientes:

$$\sum_i^n r_i x_i \geq R \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\sum_i^n a_i x_i \leq A \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n;$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n;$$

siendo  $R$  la demanda de producción por hora ( $R = \frac{mcc}{T.J.he}$ ).

Interpretación de las restricciones:

- a) El primer conjunto de restricciones ( $\sum_i^n r_i x_i \geq R$ ) indica que los rendimientos en conjunto de toda la flota de maquinaria de compactación deben ser mayor o igual a la demanda de producción por hora, es decir que se debe garantizar el cumplir con la partida en el plazo establecido.
- b) La demanda de producción por hora es determinada por el volumen a compactar en el frente de trabajo entre, el producto de la cantidad de días

útiles de trabajo por el número de jornadas por día y las horas efectivas de trabajo por día.

- c) El segundo conjunto de restricciones del problema ( $\sum_i^n a_i x_i \leq A$ ) indica que la sumatoria del área de trabajo de cada equipo no debe superar al área de compactación del frente de trabajo, llamado área de proyecto, pues de exceder, sería físicamente imposible ubicar la cantidad de maquinaria resultante, o en su defecto, se estaría arriesgando a los equipos de compactación a trabajar con distancias más cortas entre sí, exponiéndolos a que suceda algún incidente/accidente de seguridad.
- d) La tercera restricción se obtiene de la propiedad de no negatividad que tienen las variables de decisión ( $x_i \geq 0$ ), esta propiedad explica que la cantidad de equipos resultantes de la optimización deben ser positivos o 0.

En la tabla 3.3., se muestra la terminología que se manejará para el modelo matemático planteado:

Tabla 3.3. Terminología del problema de optimización de maquinarias de compactación.

PROBLEMA GENERAL	DETALLE
- $x_{1,2,\dots,n}$ : Maquinaria Ofertada	- Cantidad y modelo de maquinaria de compactación
- $a_{1,2,\dots,n}$ : Área de trabajo del equipo	- Espacio mínimo en el que una maquinaria realiza la compactación
- $r_{1,2,\dots,n}$ : Velocidad o “rendimiento” <sup>26</sup> de producción	- Indica la productividad de la maquinaria a trabajar
- $c_{1,2,\dots,n}$ : Costo unitario de alquiler de equipo	- Precio del alquiler de la maquinaria de compactación
- $S$ : Tipo de suelo	- Características físicas del material a compactar
- $mcc$ : Volumen a compactar	- Cantidad de material a compactar en el frente de trabajo
- $A$ : Área de proyecto	- Superficie en donde trabajan e interactúan la flota de maquinaria de compactación
- $T$ : Tiempo de trabajo	- Duración o plazo que se tiene planeado realizar el trabajo de compactación.

<sup>26</sup> Según Virgilio Gio, en estricto rigor, el rendimiento se define como la cantidad de recursos empleados por unidad de producción (HH/m<sup>2</sup>, HM/m<sup>3</sup> entre otros), lo inverso a ello se le define como productividad, que es la cantidad de trabajo que se realiza por recurso empleado (m<sup>2</sup>/HH, m<sup>3</sup>c/HM entre otros). Para referirnos a dicho concepto en esta investigación, se usará el término velocidad de producción.

- $he$ : Horas efectivas de trabajo por jornada	- Horas de trabajo por jornada en la que la maquinaria realmente trabaja en el proceso de compactación.
- $J$ : Número de jornadas por día	- Es la cantidad de turnos de trabajo por cada día.
- $R$ : Demanda de producción por hora	- Es la meta horaria para garantizar el plazo de ejecución de la compactación.

Fuente: Elaboración Propia

De la misma manera, definimos las unidades de las variables y función objetivo las cuales serán de importancia para la lectura y comprensión de los datos de entrada y de salida de la herramienta a programar.

Tabla 3.4. Unidades de los términos del modelo matemático.

TÉRMINO	REPRESENTACIÓN	UNIDADES
Maquinaria Ofertada	$x_i (i = 1, 2, \dots, n)$	m o máquina
Área de Trabajo del Equipo	$a_i (i = 1, 2, \dots, n)$	m <sup>2</sup> /m o m <sup>2</sup> /máquina
Velocidad de Producción	$r_i (i = 1, 2, \dots, n)$	m <sup>3</sup> /hm o m <sup>3</sup> /hora-máquina
Costo Unitario de Alquiler	$c_i (i = 1, 2, \dots, n)$	USD/hm o USD/hora-máquina
Tipo de Suelo	$S$	Adimensional
Volumen a Compactar	$mcc$	m <sup>3</sup>
Área de Proyecto	$A$	m <sup>2</sup>
Tiempo de Trabajo	$T$	d o días
Horas Efectivas de Trabajo	$he$	h/jornada o h/jornada
Número de Jornadas	$J$	Jornadas/día
Demanda de Producción por Hora	$R$	m <sup>3</sup> /h
Función Objetivo	$f_{compact}$ y/o $Z$	USD/h

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. MÉTODO SIMPLEX

El método simplex es un método de optimización lineal basado en recorrer y buscar la solución en la frontera de la región de factibilidad. Tiene un inconveniente, que es de orden exponencial. Este debe expresarse en el formato estándar (Flores, 2021).

Supongamos que se tiene un problema de programación lineal estándar que consta de  $n$  variables, sujeta a  $m$  restricciones de la forma:

$$\text{Min } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + \dots + c_{(n-1)}x_{(n-1)} + c_nx_n,$$

Sujeto a

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + \dots + a_{1(n-1)}x_{(n-1)} + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + \dots + a_{2(n-1)}x_{(n-1)} + a_{2n}x_n = b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + a_{m4}x_4 + \dots + a_{m(n-1)}x_{(n-1)} + a_{mn}x_n = b_m$$

Adecuado a nuestro modelo de optimización:

$x_i$ : Incógnitas ( $x_i \geq 0$  y  $m \leq n$ ), representan la cantidad y tipo de equipos de compactación que trabajarán en el frente de trabajo.

$c_i$ : Coeficientes con valores conocidos, representan el costo de la maquinaria de compactación.

$a_i$ : Coeficientes con valores conocidos: ya sea la velocidad de producción por máquina o el área en la que se desenvuelve cada equipo de compactación.

$b_i$ : Términos independientes ( $b_i \geq 0$ ), representan las restricciones a cumplir, ya sea la demanda de producción horaria o el área total que se dispone para que la flota de equipos a diseñar pueda trabajar.

Como veremos en el capítulo siguiente, el desarrollo del modelo de optimización basado en el método simplex, en la variable de dos fases, se ejecutará de manera externa, a través de un programa *online*<sup>27</sup> que nos devuelva las cantidades optimizadas.

---

<sup>27</sup> Que está disponible o se realiza a través de internet o de otra red de datos.

### 3.4. RESUMEN

Se desarrolló el modelo matemático a utilizar y los fundamentos que respaldarán el programa de optimización del proceso de compactación, a través de razonamientos materializados en formulaciones y ecuaciones. Es importante mencionar que este modelo es aplicable para optimizar otros modelos dentro de la cadena de producción como el transporte de agregados, requerimiento de materiales, costo mínimo de traslado entre otros.

También se utilizó el método de las dos fases, que como vimos, viene a ser una variante del algoritmo simplex, como método analítico que permite solucionar el modelo de optimización de la flota de maquinaria de compactación, pues el modelo de optimización planteado presenta restricciones del tipo mayor igual " $\geq$ " y menor o igual " $\leq$ ".

## CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL SOFTWARE

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones algebraicas siguiendo los métodos analíticos estudiados nos permiten calcular la solución óptima de un modelo matemático, vale decir, mejorar el valor numérico obtenido de la maximización o minimización según sea el objetivo a lograr. Ahora bien, debido a la cantidad de restricciones que puede presentar el modelo, o las variables que la constituyen debido a situaciones muy comunes de la vida real, el modelo matemático demandará cálculos tediosos y repetitivos.

El tiempo que toma resolver un problema de programación lineal utilizando el método simplex, en su variable de dos fases, depende de diversos factores, siendo el principal de ellos el número de restricciones que presenta el modelo. (Hillier y Lieberman, 2010) estiman que el tiempo de cálculo tiende a ser proporcional al cubo del aumento de restricciones, así que, al duplicarlo, el tiempo que toma puede quedar multiplicado por un factor aproximado a ocho. En conclusión, se hace necesario implementar y/o procesar dichos cálculos mediante el desarrollo de un software que, en este caso, será una combinación de un aplicativo de teléfono celular que empleará un programa web de resolución de sistemas de programación lineal a fin de realizar las operaciones y luego devolver los resultados a dicha aplicación a fin de podamos visualizar los resultados de la optimización.

### 4.2. SINOPSIS DEL PROGRAMA

El objetivo de esta tesis es crear un programa que pueda dimensionar una flota de maquinaria de compactación para un frente o proyecto en específico, dicho objetivo se realizará desarrollando un aplicativo móvil llamado *OptimiAPP*. Veamos en esta parte en dónde se sostiene este programa, qué lenguajes de programación se van a emplear, el esquema de flujo de información/datos y el algoritmo de solución.

#### 4.2.1. Entorno de Desarrollo Integrado

Un Entorno de Desarrollo Integrado IDE<sup>28</sup> es un programa informático que proporciona servicios integrales para facilitarle al programador el desarrollo del software. Estos proveen un marco de trabajo compatible con los diversos lenguajes de programación disponibles como: C++, PHP, Python, Java y demás. Este entorno es necesario para desarrollar cualquier aplicativo web o móvil, en este caso, el IDE que usaremos será *Android Studio*.

##### 4.2.1.1. *Android Studio*

Es el IDE oficial para el desarrollo de aplicaciones para Android (Android®, 2020). Ofrece un editor de código flexible y herramientas como el emulador rápido y cargado de funciones Java. Veamos el interfaz de usuario para conocer la plataforma de programación.

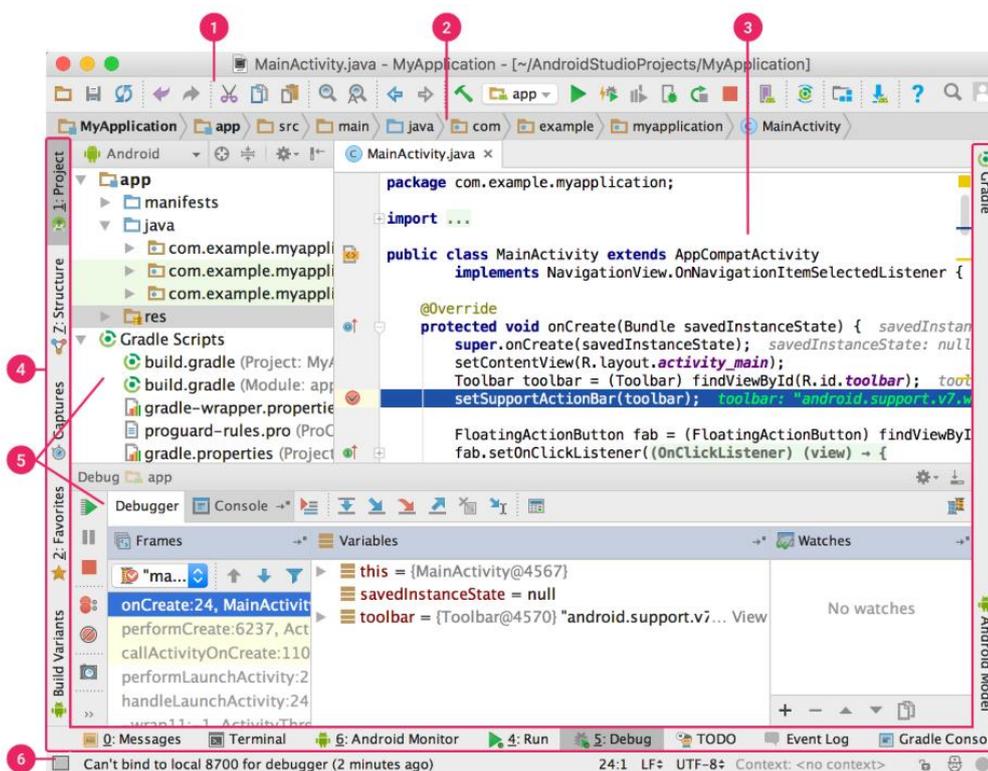


Figura 4.1. Ventana Principal de Android Studio.

Fuente: Elaboración Propia

Los elementos que conforman el entorno de desarrollo de *Android Studio* es el siguiente:

<sup>28</sup> IDE: Integrated Development Environment por sus siglas en inglés.

- 1) Barra de Herramientas: Te permite realizar una gran variedad de acciones, como ejecutar tu app e iniciar las herramientas de Android.
- 2) Barra de Navegación: Ayuda a explorar tu proyecto y abrir archivos para editar. Proporciona una vista más compacta de la estructura visible en la ventana *Project*.
- 3) Ventana de Editor: Es el área en la que puedes crear y modificar código. Según el tipo de actividad actual, el editor puede cambiar. Por ejemplo, cuando ves un archivo de diseño, el editor muestra el Editor de Diseño.
- 4) Barra de Ventana de Herramientas: Se encuentra afuera de la ventana del IDE y contiene los botones que te permiten expandir o contraer ventanas de herramientas individuales.
- 5) Ventana de Herramientas: Brindan acceso a tareas específicas, como la administración de proyectos, la búsqueda, el control de versiones, entre otras. Puedes expandirlas y contraerlas.
- 6) Barra de Estado: Muestra el estado de tu proyecto y del IDE, además de advertencia o mensajes.

#### 4.2.2. Lenguajes de Programación a Emplear

En informática, el lenguaje de programación es un idioma artificial diseñado para expresar computaciones<sup>29</sup> que pueden ser llevadas a cabo por ordenadores en general. Pueden usarse para crear programas que controlen el comportamiento lógico de una máquina, para expresar algoritmos con precisión, como el caso de esta tesis, o como modo de comunicación humana. Con el fin de programar la herramienta debemos revisar el entorno de desarrollo integrado en el que se programará y los lenguajes de programación a emplear en esta tesis.

##### 4.2.2.1. Java

Lenguaje de propósito general cuya filosofía se basa en la siguiente premisa: “*Write once, run anywhere*”; es decir, que el código que se haya desarrollado sea capaz de ser ejecutado en cualquier plataforma virtual y no necesite ser

---

<sup>29</sup> Especificar de manera precisa sobre qué datos debe operar una computadora, cómo deben ser almacenados y/o transmitidos y qué acciones debe tomar bajo una variada gama de circunstancias.

recompilado para ejecutarse en otra, un ejemplo de ello es trabajar en cualquier sistema operativo, ya sea Mac, Windows o Linux.

Java maneja varias versiones de acuerdo al objeto en donde será orientada el código a elaborar, veamos.

Tabla 4.1. Versiones de Java.

Versión Java	Orientación de la versión
Java EE™	Proyectos en web y entorno de desarrollo estándar o multifuncional.
Java SE™	Desarrollo de aplicaciones móviles y dispositivos con sistema operativo portátil.
J2ME	Desarrollo de dispositivos de bajo nivel (controles remotos, electrodomésticos, etc).

Fuente: Salgado (2016)

Del cuadro se desprende que usaremos la versión de Java SE, ahora bien, luego de ello aparece el paquete JDK<sup>30</sup> o Kit de Desarrollo de Java, que es un kit que contiene todas las librerías para crear aplicaciones como las de esta tesis utilizando el lenguaje de programación Java, esta incluye herramientas útiles para desarrollar y probar programas escritos en el lenguaje de programación, la ventaja en programación Android es que este lenguaje de programación y el kit correspondiente ya viene precargada e instalada en el IDE *Android Studio*.

#### 4.2.2.2. PHP

Es un lenguaje de programación de código abierto adecuado para el desarrollo web y que puede ser funcional en HTML<sup>31</sup> o lenguaje de codificación o marcado de hipertexto, que es el lenguaje de marcado para desarrollo de páginas web (PHP, 2004).

La ventaja del uso de PHP es que el código de programación es ejecutado en el servidor web, generando su respectivo HTML y lo envía directamente al usuario, este recibirá el resultado de ejecutar el script<sup>32</sup> pero sin el código detrás del programa en este lenguaje de programación.

<sup>30</sup> Java Development Kit por sus siglas en inglés.

<sup>31</sup> Hyper Text Markup Language por sus siglas en inglés.

<sup>32</sup> Script es el código de programación sencillo, que contiene comandos que se van ejecutando de manera secuencial. Usado para controlar el comportamiento de un programa en específico.

El uso de este lenguaje en la aplicación será de manera indirecta, pues esta será materializada a través del programa de uso libre llamado *PHPSimplex* v0.81, basado en el lenguaje de programación PHP y desarrollado por Daniel Izquierdo y Juan Ruiz, cuyo objetivo es procesar un problema de programación lineal basado en el método simplex desarrollado en el capítulo anterior.

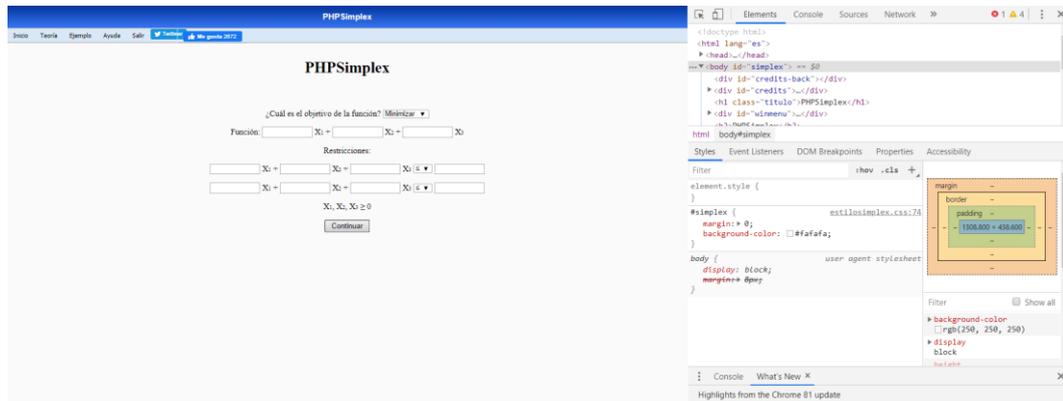


Figura 4.2. Ventana principal de PHPSimplex, programa basado en el lenguaje PHP en la web.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.3. Servicio Web

El Servicio Web es la tecnología que utiliza un conjunto de protocolos que sirven para poder intercambiar datos y entregables entre aplicaciones, esto es, que distintas aplicaciones de software desarrolladas en lenguajes de programación diferentes y ejecutadas sobre cualquier plataforma, pueden utilizar los servicios web para intercambiar datos en redes de computadoras como lo es la Internet.

Para nuestro caso, esta tecnología nos ayudará a poder intercambiar datos ingresados en la aplicación celular.



Figura 4.3. Esquematación del Servicio Web.  
Fuente: Guardian Tech (2018)

#### 4.2.4. Esquema del Programa

El desarrollo del programa requiere un esquema de flujo específico, definiendo la forma de ingreso de data, el envío hacia el programa web, el procesamiento de datos, la devolución de argumentos, el almacenamiento, interpretación y salida de datos. Veamos esquemáticamente todo ello:

- Programa Cliente (Service Requestor)

Es el aplicativo en el que se insertan los datos de entrada necesarios para que pueda solicitar un servicio web a fin de resolver el problema de programación lineal, que en nuestro caso es *OptimiAPP*. Este se pone en contacto con el UDDI para localizar al Proveedor (Service Provider).

- UDDI (Universal Description, Discovery & Integration)

Es un directorio de interfaces de servicio web que están descritos en WSLD y que se comunican mediante un protocolo conocido como SOAP. Es un estándar para poder buscar un servicio web en base a las características requeridas por el cliente.

- WSLD (Web Service Description Language)

Es un lenguaje a fin de describir los servicios web disponibles en el internet y cómo poder acceder a ellos, es parte del estándar UDDI descrito, siendo éste el lenguaje utilizado.

- Programa Proveedor (Service Provider)

Es un programa web que procesa cierto tipo de información y devuelve argumentos o data en base a ello. Este genera el WSDL describiendo los servicios de su o sus aplicaciones y resultados. En nuestro caso será el programa web basado en el lenguaje PHP quien jugará este papel y quien procesará la información de la data ingresada en la aplicación celular previamente adecuada en dicha aplicación según el protocolo de datos de entrada propios del PHPSimplex, devuelve el conjunto solución a la aplicación inicial.

- Biblioteca (Volley)

Es una biblioteca que suministra y acelera el uso de redes en aplicaciones para Android. La principal ventaja de Volley es que se puede integrar fácilmente con cualquier protocolo y también incluye compatibilidad con cadenas o *'strings'* sin procesar, imágenes, entre otros. Es una biblioteca HTTP<sup>33</sup>.

- SOAP

Es el protocolo para realizar el intercambio de información entre diversas aplicaciones. Posee un formato para poder enviar y recibir mensajes a fin de servir como comunicación en la Web. Todo lo descrito anteriormente tiene que cumplir el protocolo SOAP para que pueda realizarse el proceso de intercambio de data entre aplicaciones y programas.

Teniendo todos los elementos podemos esquematizar el funcionamiento de nuestra aplicación en torno al servicio web de la siguiente manera:

1. Se ingresan los datos de entrada a la aplicación.
2. La aplicación transforma los datos en base a la forma en como el programa web proveedor procesará la información.
3. La aplicación convoca al UDDI para la búsqueda del programa Web, entre tanto los datos se guardan en la biblioteca Volley.
4. Se encuentra al programa web proveedor y se verifica que los datos a ingresar sean compatibles a la forma de entrada del programa web.
5. Se ingresan los datos y el programa web procesa la información y devuelve los datos de salida al Volley.
6. La aplicación inicial receptiona los datos enviados por el programa Web proveedor y los transforma para que puedan ser compatibles con los datos de salida que debe entregar al usuario.
7. La aplicación entrega los datos de salida y cumple el objetivo para el cual fue programado.

Veamos el siguiente esquema de manera gráfica.

---

<sup>33</sup> HTTP: Es un protocolo de transferencia de hipertexto usado en la Web. Este opera por petición y respuesta entre el cliente y el servidor. Usualmente las peticiones tienen que ver con archivos, ejecución de programas o consulta a una base de datos.

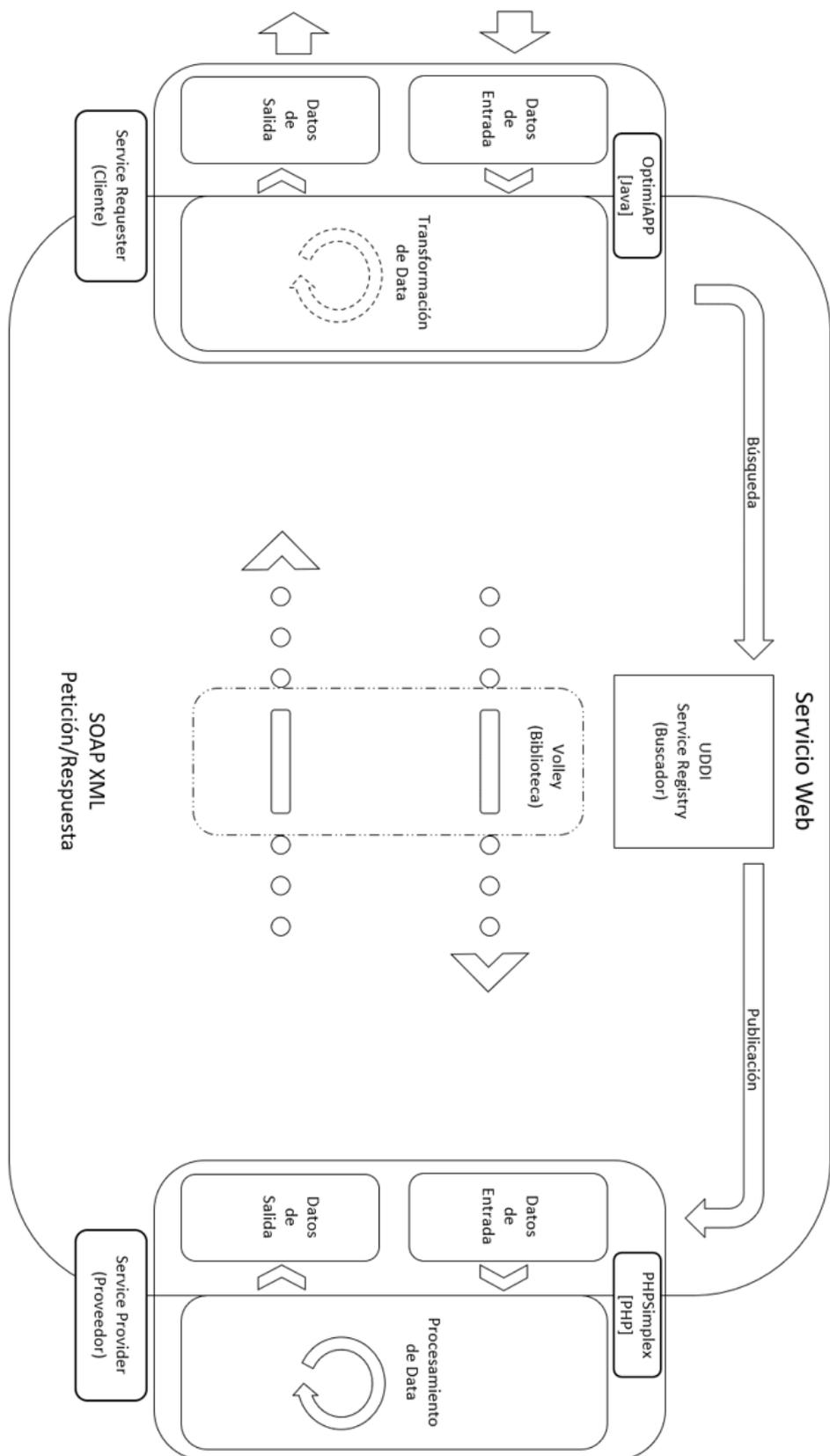


Figura 4.4. Esquema de flujo y procesamiento de información del programa o aplicativo  
 Fuente: Elaboración Propia

### 4.3. PROGRAMACIÓN DEL MODELO

#### 4.3.1. Diagrama de Flujo del Programa

Se construye el diagrama de flujo a programar en base al modelo desarrollado en el capítulo III para nuestro software denominado *OptimiAPP*, resaltando los procesos de *Equipo* y *Proyecto* en el cuerpo.

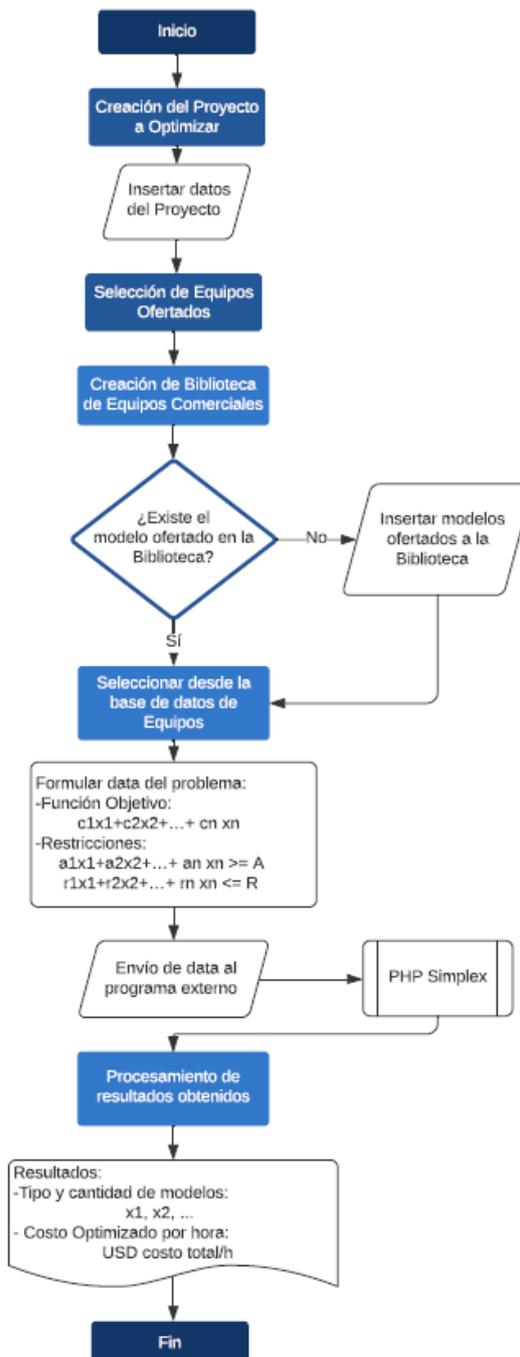


Figura 4.5. Diagrama de flujo del problema de optimización de equipos de compactación.

Fuente: Elaboración Propia

El siguiente paso es desarrollar el programa en el IDE y lenguaje definido.

#### 4.3.2. Estructura del Programa para el Problema de Dimensionamiento

La aplicación está desarrollada para dispositivos móviles Android utilizando el lenguaje de programación Java, haciendo uso del IDE Android Studio. Se muestra la ficha técnica:

Nombre de aplicación	:	<i>OptimiAPP</i>
IDE	:	Android Studio versión 4.2 Canary 4
Tiempo de ejecución	:	1.8.0_242-release-1644-b3-6222593 x86_64
Máquina Virtual (VM <sup>34</sup> )	:	OpenJDK 64-Bit Server VM by JetBrains
Almacenamiento	:	7.66 MB (Megabyte)
Versión Android Requerido	:	Android 10

La programación de la aplicación está compuesta por paquetes y clases para la ejecución del algoritmo de solución, como se muestra en la siguiente figura:

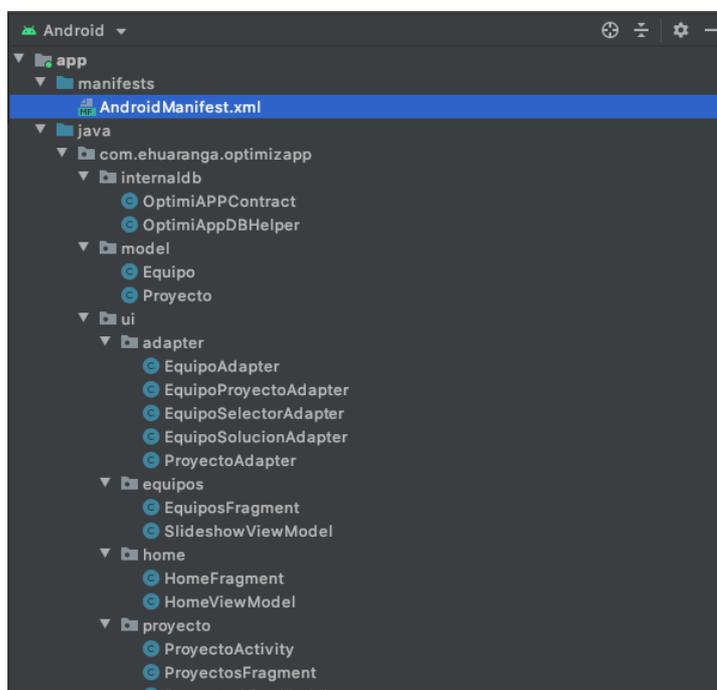


Figura 4.6. Estructura de programación del aplicativo *OptimiAPP* desde el IDE Android Studio.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>34</sup> Virtual Machine por sus siglas en inglés. Es un software que simula un sistema de computación y ejecuta programas dentro de otro sistema de computación, de manera independiente pero limitado a su programación original.

Veamos en principio el algoritmo de solución del problema de optimización de equipos de compactación. Nuestro modelo tiene la forma:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_i^n c_i x_i,$$

Sujeto:

$$\sum_i^n r_i x_i \geq R \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n;$$

$$\sum_i^n a_i x_i \leq A \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n;$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n;$$

Para contener estas relaciones el algoritmo está estructurado en dos grandes grupos: *Equipo* y *Proyecto*. Estos grupos poseen paquetes propios a fin de relacionar sus funciones en el proceso de generación de la función objetivo y de las dos restricciones. Veamos.

- **Equipo:**

Es la parte que genera los tipos o modelos de equipos disponibles  $x_i$ , las áreas de trabajo de cada modelo  $a_i$ , las variables de velocidad de producción  $r_i$  y los costos de alquiler  $c_i$ . Los paquetes que lo contienen son:

- *model*: Equipo
- *iu/adapter*: EquipoAdapter
- *iu/equipos*: EquiposFragment

- **Proyecto:**

Es la parte en donde se genera toda la concepción del problema de optimización y solución del modelo. Aquí se ingresan todos los datos del proyecto a optimizar, se seleccionan los equipos disponibles desde Equipo, que trabaja dentro de este paquete, y generan las restricciones ( $\sum_i^n r_i x_i \geq R$ ,  $\sum_i^n a_i x_i \leq A$  y  $x_i \geq 0$ ) con la función objetivo ( $Z$ ); envían los datos al programa externo (Service Provider) y muestran los datos de salida o solución.

- *model*: Proyecto
- *iu/adapter*: EquipoProyectoAdapter, EquipoSelectorAdapter, EquipoSolucionAdapter, ProyectoAdapter.
- *iu/proyectos*: ProyectosFragment, ProyectosActivity.

Ahora, clasifiquemos a los paquetes y clases según su funcionalidad. Por un lado, se tiene el paquete **internaldb** y **model**, que se encargan de la parte lógica de la aplicación. Desarrollemos cada uno de ellos con sus respectivas clases.

- **Paquete: *internaldb***

- Clase: OptimizAPPContract

En esta clase se declaran los nombres de las tablas y el nombre de las columnas que se emplearán en toda la aplicación.

- Clase: OptimizAppDBHelper

Esta clase es la encargada de todo el manejo y procedimientos a nivel de base de datos interna SQLite<sup>35</sup>.

- **Paquete: *model***

- Clase: Equipo

Esta clase es un modelo del objeto Equipo, en donde se detallan las características de los equipos de compactación. Por ejemplo:

- id (Identificador o Nombre)
- codigo (del equipo o maquinaria)
- tipoSuelo (Tipo de Suelo)
- porcentajeProctor (Porcentaje Proctor del Suelo)
- anchoEfectivo (Ancho Efectivo de Compactación)
- velocidadOperacion (Velocidad de Operación del Equipo)
- numeroPasadas (Número de Pasadas del Equipo)
- ancho (Ancho de Equipo)
- largo (Largo de Equipo)
- distanciaLateral (Distancia Lateral del Equipo)
- distanciaFrontal (Distancia Frontal del Equipo)
- costo (Costo Horario del Equipo)
- areaEquipoTrabajo (Área de Trabajo del Equipo)

- Clase: Proyecto

Esta clase es un modelo del objeto Proyecto, donde se detallan las características del proyecto de construcción a ejecutar. Por ejemplo:

- Id (Identificador o Nombre)

---

<sup>35</sup> SQLite es un sistema de gestión de bases compatible con Android de datos relacional, es decir, que se ajusta a las relaciones lógicas que forman parte del programa en cuestión.

- titulo (Título del Proyecto)
- descripcion (Breve Descripción del Proyecto)
- espesor (Espesor de Compactación Permitido en el Proyecto)
- factorEficiencia (Factor de Eficiencia del Proyecto)
- altura (Altura Sobre el Nivel del Mar del Proyecto)
- area (Área Total del Proyecto)
- mcc (Metros Cúbicos Compactados)
- he (Horas Efectivas de Trabajo por Jornada)
- jornadas (Número de Jornadas por Día)
- t (Tiempo de Ejecución del Proyecto)
- tipoSuelo (Tipo de Suelo a Compactar)
- proctor (Porcentaje Proctor del Suelo)
- equipos (Seleccionar Equipos Disponibles)

Por otro lado, tenemos el paquete **ui** con sus respectivos sub paquetes **adapter**, **equipos**, **home** y **proyecto**. Aquí es donde se especifica la parte visual de la aplicación y está diseñada de la siguiente manera:

- **Paquete: ui**

- **Sub paquete: adapter**

- Clase: EquipoAdapter  
Esta clase permite manejar y poblar de información la lista de equipos.
- Clase: EquipoProyectoAdapter  
Esta clase permite manejar y poblar de información la lista de equipos asociados a un proyecto.
- Clase: EquipoSelectorAdapter  
Esta clase permite manejar y poblas de información la lista de equipos que se pueden asociar o seleccionar a un proyecto.
- Clase: EquipoSolucionAdapter  
Esta clase permite manejar y poblar de información la lista de equipos que se muestran como solución de un proyecto.
- Clase: ProyectoAdapter  
Esta clase permite manejar y poblar de información la lista de equipo.

### **Sub paquete: *equipos***

- Clase: EquiposFragment  
Este *Fragment*<sup>36</sup> es la vista principal del listado de Equipos disponibles según la base de datos interna.

### **Sub paquete: *home***

- Clase: HomeFragment  
Este *Fragment* es la vista principal para la parte de la presentación e información del proyecto. Se muestra al iniciar la aplicación.

### **Sub paquete: *proyectos***

- Clase: ProyectosFragment  
Este *Fragment* es la vista principal del listado de Proyectos disponibles según la base de datos interna.
- Clase: ProyectosActivity  
Esta actividad muestra los detalles de un proyecto específico, permite modificarlo para agregar tanto a los equipos como a los modelos y realiza la consulta a PHPSimplex.

En el Anexo N° 01 y 02 se adjuntan los principales comandos usados y el código en archivo de todo el programa, subdividido en paquetes y clases según cómo está programado en Android Studio.

Al abrir la aplicación, esta nos da la bienvenida. Podemos apreciar el menú desplegable ubicado en la esquina superior derecha que, al seleccionarla, nos muestra las siguientes opciones: (ver figura 4.7.)

- *Acerca de la tesis*: En donde se muestra el interfaz de inicio y descripción de la aplicación.
- *Proyectos*: En donde se crearán los proyectos de construcción a optimizar.
- *Equipos*: En donde se ingresarán los datos referentes a los equipos ofertados.

---

<sup>36</sup> Un *Fragment* representa un comportamiento o una parte de la interfaz de usuario del aplicativo programado. Puedes combinar varios *Fragment* en una sola actividad para crear una acción.

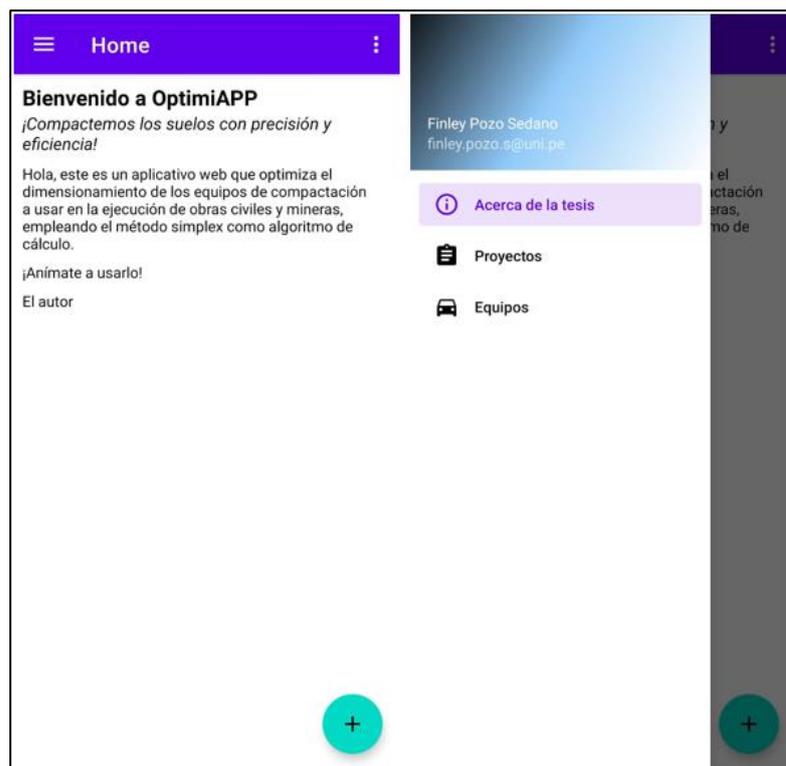


Figura 4.7. Interfaz de inicio de la aplicación *OptimiAPP* y barra de menú desplegable.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4. DATOS DE ENTRADA DEL SOFTWARE

En esta parte usaremos un proyecto a manera de ejemplo a fin de entender la dinámica del aplicativo basado en nuestro modelo matemático. A continuación, presentamos los datos de entrada en base a la terminología del problema de dimensionamiento de equipos de compactación.

##### Proyecto ABC

##### Equipos Ofertados

Modelo 01	:	CS54 B	
Costo Horario 01	:	25.00	USD/hm
Modelo 02	:	CS56 B	
Costo Horario 02	:	35.00	USD/hm
Modelo 03	:	CS64 B	
Costo Horario 03	:	50.00	USD/hm

##### Condiciones de Proyecto

Tipo	:	Carretera
Longitud	:	520.00 m

Ancho de Vía	:	13.50	m
Área Proyecto (Longitud x Ancho)	:	7'020.00	m <sup>2</sup>
Volumen a Compactar	:	21'000.00	m <sup>3</sup> compactados
Plazo de Ejecución	:	20	Días
Jornadas	:	01	Jornada/Día
Horas Efectivas	:	5.00	h/Jornada
Factor de Eficiencia de Trabajo	:	0.75	Condiciones Buenas
Tipo de Suelo	:	Semicohesivo	
Porcentaje Proctor Modificado	:	95	%
Espesor de Capa	:	0.20	m
Altura del Proyecto	:	2500.00	msnm

#### 4.4.1. Datos de Entrada de Equipos

La aplicación desarrollada *OptimiAPP*, requiere en primer lugar los datos referentes a los equipos ofertados  $x_i$ , al costo asociado a ellos  $c_i$ , estos se extraen de los proveedores de equipos de compactación; y, por último, requiere las características productivas y de geometría de estos equipos vistas en los capítulos II y III. Veamos.

Figura 4.8. Datos de entrada de Equipos en la aplicación.

Fuente: Elaboración Propia

Para los modelos ofertados, con el tipo de suelo S semicohesivo y porcentaje Proctor Modificado %PM del 95%, estos requieren un número de pasadas N indicados en tabla 2.11. y serán insertados en los modelos de equipos a crear. Para el largo, ancho, distancia lateral DL, distancia frontal DF tomaremos los valores indicados en la tabla 3.3. Recordar que para el ancho efectivo W debemos considerar un traslape Lo de 0.15 m del ancho de equipo y la velocidad de operación V considerada será de 2500 m/hm, tópicos desarrollado en la parte de Producción de Maquinaria de Compactación. Agregamos los modelos a la aplicación en sus respectivas unidades.

Modelo	Código	Tipo de suelo	Porcentaje de proctor modificado	Ancho efectivo de compactación (m)	Velocidad de Operación (m/HM)	Ancho (m)	Largo (m)	Distancia lateral (m)	Distancia frontal (m)	Número de pasadas	Costo
CS54B	CS54B	Semicohesivo	95	1.984	25000	2.134	5.85	5	5	9	25
CS56B	CS56B	Semicohesivo	95	1.984	25000	2.134	5.85	5	5	8	35
CS64B	CS64B	Semicohesivo	95	1.984	25000	2.134	5.85	5	5	7	50

Figura 4.9. Datos de entrada ingresados de los modelos ofertados CS54 B, CS56 B y CS64 B.

Fuente: Elaboración Propia

La biblioteca de la aplicación contiene precargado los modelos de la tabla 2.11. para mejor experiencia del usuario. Si en un proyecto en específico se tienen otros modelos fuera de la base de datos, ya sea por diferencia de dimensiones del equipo, número de pasadas, velocidad de operación entre otros; tales modelos podrán ser agregados para usarlos en el proyecto a optimizar sin inconvenientes.

#### 4.4.2. Datos de Entrada de Proyectos

En esta parte, la aplicación requiere los datos técnicos del proyecto tales como volumen a compactar  $mcc$ , área del proyecto  $A$ , espesor de capa  $e$ , plazo de ejecución  $T$ , horas efectivas por jornada  $he$ , número de jornadas  $J$ , altura (en

msnm), el factor de eficiencia del trabajo **E**, tipo de suelo **S** y porcentaje de Proctor Modificado **%PM** a fin de filtrar de biblioteca a los equipos que realicen la actividad.

Figura 4.10. Datos de entrada de Proyectos en la aplicación.

Fuente: Elaboración Propia

Ingresamos los datos del proyecto de ejemplo “Proyecto ABC”, en las unidades respectivas y presionamos agregar. Nos enviará al detalle del proyecto.

Agregar nuevo proyecto		Proyecto ABC Carretera	
Título Proyecto ABC		Detalle del proyecto	
Descripción Carretera		Espesor (cm) 20	Factor eficiencia 0.75
Espesor (cm) 20	Jornadas 1	Altura (msnm) 2500	Área proyecto (m2) 7020.0
Factor eficiencia 0.75	Altura (msnm) 2500	Volumen de relleno a compactar(m3) 21000.0	
Área proyecto (m2) 7020	Relleno a compactar(m3) 21000	Horas efectivas 5.0	Tipo suelo Semicohesivo(95.0%)
Horas efectivas 5	Plazo de ejecución (días) 20	Plazo de ejecución (días) 20.0	Jornadas 1
Tipo suelo Semicohesivo	Porcentaje proctor 95.0	Equipos <span style="float: right;">AGREGAR EQUIPO</span>	
AGREGAR			

Figura 4.11. Datos de entrada del “Proyecto ABC” en la aplicación y pantalla de detalle.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5. PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento inicia con la elección “Agregar Equipo” desde la biblioteca para especificar los equipos ofertados (insertados en la parte de Equipos). En esta parte la aplicación calculará los datos de velocidad de producción  $r_i$  de cada modelo, visto en el capítulo II y se podrá modificar el costo horario  $c_i$  o dejarlo tal cual se encuentra. Seleccionamos los modelos en la aplicación:



Figura 4.12. Selección de modelos disponibles del proyecto.

Fuente: Elaboración Propia

Calculando la velocidad de producción  $r_i$  de manera manual.

CS54 B:

$$r_1 = \frac{W.V.e.E}{N.(1+h)} = \frac{1.984 \times 2500 \times 0.20 \times 0.75}{9 \left(1 + \frac{2500 - 1000}{10\,000}\right)} = 71.884 \text{ m}^3/\text{hm}$$

CS56 B:

$$r_2 = \frac{W.V.e.E}{N.(1+h)} = \frac{1.984 \times 2500 \times 0.20 \times 0.75}{8 \left(1 + \frac{2500 - 1000}{10\,000}\right)} = 80.869 \text{ m}^3/\text{hm}$$

CS64 B:

$$r_3 = \frac{W.V.e.E}{N.(1+h)} = \frac{1.984 \times 2500 \times 0.20 \times 0.75}{7 \left(1 + \frac{2500 - 1000}{10\,000}\right)} = 92.422 \text{ m}^3/\text{hm}$$

Veamos lo calculado por la aplicación.

Proyecto ABC Carretera		Proyecto ABC Carretera		Proyecto ABC Carretera	
Detalle del proyecto		Detalle del proyecto		Detalle del proyecto	
Esesor (cm)	Factor eficiencia	Esesor (cm)	Factor eficiencia	Esesor (cm)	Factor eficiencia
20	0.75	20	0.75	20	0.75
Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)
2500	7020.0	2500	7020.0	2500	7020.0
Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)	
21000.0		21000.0		21000.0	
Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo
5.0	Semicohesivo(95.0%)	5.0	Semicohesivo(95.0%)	5.0	Semicohesivo(95.0%)
Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas
20.0	1	20.0	1	20.0	1
Equipos		Equipos		Equipos	
<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>	
CS54B	CS56B	S54B	CS56B	CS64B	CS56B
95.0%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%
9 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	8 pasadas
\$25.0	\$35.0	\$50.0	\$35.0	\$50.0	\$35.0
R1=71.88406	R1=80.86957	R1=71.88406	R1=80.86957	R1=92.42	R1=80.86957
<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>	

Figura 4.13. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción  $r_i$ .

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 4.13. podemos contrastar el correcto cálculo de la velocidad de producción calculada de forma manual con los obtenidos con la aplicación (indicados como R1, R2 y R3).

Recordar que podemos modificar el costo horario de cada equipo en esta etapa al picar en cada modelo.

Ahora formulemos el problema de optimización, la función objetivo y las restricciones.

Optimizar:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3$$

Sujeto a:

$$r_1x_1 + r_2x_2 + r_3x_3 \geq R \quad ; \quad R = \frac{mcc}{T.J.he}$$

$$a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \leq A \quad ; \quad a_i \text{ en la tabla 3.3.}$$

$$x_1; x_2; x_3 \geq 0$$

Reemplazando los valores:

$$Z = 25x_1 + 35x_2 + 50x_3 \quad (\text{USD/h})$$

Sujeto a:

$$71.88x_1 + 80.87x_2 + 92.42x_3 \geq 210 \quad ; \quad R = \frac{21\,000}{20x_1x_5} = 210 \quad (\text{m3/h})$$

$$193x_1 + 193x_2 + 193x_3 \leq 7\,020 \quad (\text{m2})$$

$$x_1; x_2; x_3 \geq 0$$

Ahora veamos en la siguiente figura la función objetivo y las restricciones calculadas por la aplicación.

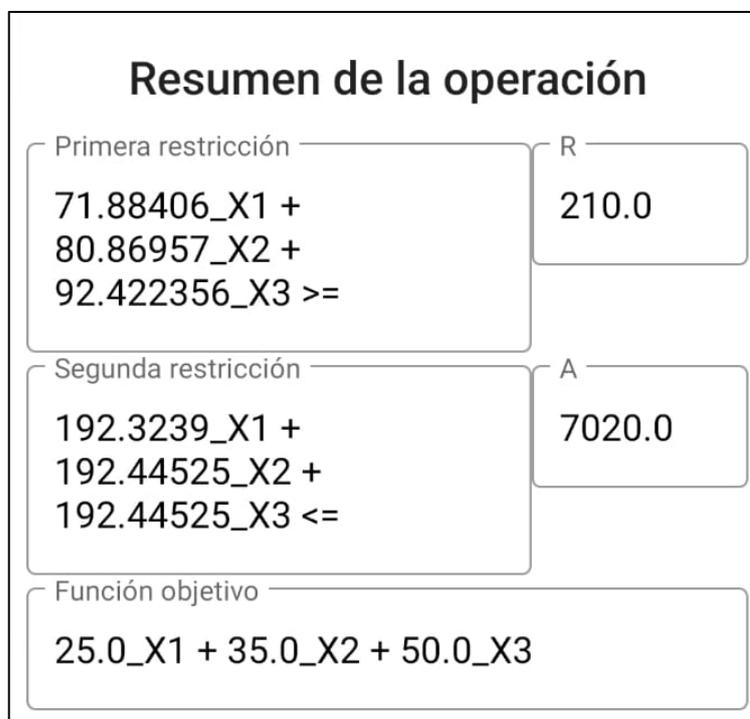


Figura 4.14. Resumen de la operación en *OptimizAPP*, con la función objetivo y las restricciones.

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 4.14 se puede contrastar el correcto cálculo de la función objetivo y las restricciones para el proyecto de ejemplo.

Por otro lado, en la restricción del espacio (segunda restricción), se tiene una diferencia en el valor del área de trabajo de cada equipo  $a_i$ , esto se debe a que *OptimizAPP* realiza el cálculo del área de manera exacta y sin redondear; a diferencia de los 193.00 m<sup>2</sup> con redondeo incluido mostrados en la tabla 3.3. de esta tesis.

#### 4.6. DATOS DE SALIDA DEL SOFTWARE

En esta sección se describe el producto que brinda la aplicación. En la misma pantalla de la función objetivo y restricciones, nos muestra la flota de equipos y el costo optimizado.

##### 4.6.1. Cantidad y Tipo de Equipos de Compactación

La aplicación nos muestra la cantidad y tipo o modelo de rodillo compactador a alquilar a fin de cumplir con las condiciones del proyecto.

<b>Modelo 1 (CS54B):</b>	3.0 unidades
<b>Modelo 2 (CS56B):</b>	0.0 unidades
<b>Modelo 3 (CS64B):</b>	0.0 unidades

Figura 4.15. Flota de equipos de compactación optimizada por *OptimiAPP*.

Fuente: Elaboración Propia

Observamos que la aplicación recomienda el alquiler de los siguientes equipos:

- Cantidad y tipo de equipos de compactación (Unidades):
  - $x_1$  (CS54 B) = 3.00
  - $x_2$  (CS56 B) = 0.00
  - $x_3$  (CS64 B) = 0.00

Los datos de salida de equipos son tres (3) compactadores del modelo CS54 B Caterpillar u otros rodillos vibratorios de similares características, a fin para cumplir con el objetivo del proyecto en el plazo establecido.

##### 4.6.2. Función Objetivo Optimizado

En esta parte observaremos el costo horario total de los equipos de compactación optimizados.

Veamos la función objetivo optimizada que nos brinda la aplicación.



Figura 4.16. Valor de la función objetivo optimizada por *OptimiAPP*.

Fuente: Elaboración Propia

La aplicación arroja el siguiente resultado:

- Función objetivo optimizada (USD/h):

$$Z = 75.00$$

Como se observa, 75.00 USD/h es el valor de la función objetivo optimizada con la flota de equipos de compactación determinada por la aplicación.

Es importante resaltar el hecho de que las unidades del costo optimizado se entregan en USD/h porque si bien tenemos el plazo (en días), la cantidad de jornadas por día y las horas efectivas por jornada, estos son estimados realizados en la etapa de planeamiento de obra y pueden variar; para hallar el costo real se multiplicará las horas en servicio (obtenidas de los partes diarios de los equipos contratados) por la función objetivo determinada en esta parte. Es la versatilidad del resultado expresado en USD/h.

#### 4.7. VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE

A fin de corroborar los resultados que se obtienen con la aplicación *OptimiAPP* desarrollado y presentado en la sección 4.6, se resolverá el mismo problema de programación lineal mediante el software Microsoft Excel, usando el complemento SOLVER. Este complemento permite resolver problemas con un número ilimitado de variables y restricciones de una manera didáctica y sencilla.

Para trabajar con SOLVER, se debe de ingresar el modelo del problema de optimización en las celdas correspondientes, según los lineamientos del software.

Se presentan a continuación los datos de ingreso en SOLVER del ejemplo aplicativo resuelto anteriormente con *OptimiAPP*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		Costo Horario			Variables de Decisión:				
3		C1 (CS54 B) =	25.00		X1 (CS54 B) =				
4		C2 (CS56 B) =	35.00		X2 (CS56 B) =				
5		C3 (CS64 B) =	50.00		X3 (CS64 B) =				
6									
7		Velocidad de Producción			Función Objetivo:				
8		r1 (CS54 B) =	71.88		Z =	0			
9		r2 (CS56 B) =	80.87						
10		r3 (CS64 B) =	92.42		Restricciones:				
11									
12		Área de Trabajo de Equipo		N°01	0	>=	210.00		
13		a1 (CS54 B) =	192.32	N°02	0	<=	7020.00		
14		a2 (CS56 B) =	192.45						
15		a3 (CS64 B) =	192.45						
16									
17		Demanda de Producción							
18		R (Proyecto) =	210.00						
19									
20		Área de Proyecto							
21		A (Proyecto) =	7020.00						
22									
23									

Figura 4.17. Problema de optimización de equipos de compactación Proyecto ABC en el software Ms Excel – SOLVER.

Fuente: Elaboración Propia

Luego de digitalizar el problema en la tabla de Excel, nos vamos a la pestaña Datos, seleccionamos la opción SOLVER y nos aparecerá una ventana de diálogo en el que insertaremos la función objetivo y restricciones desde la tabla Excel ya elaborada.

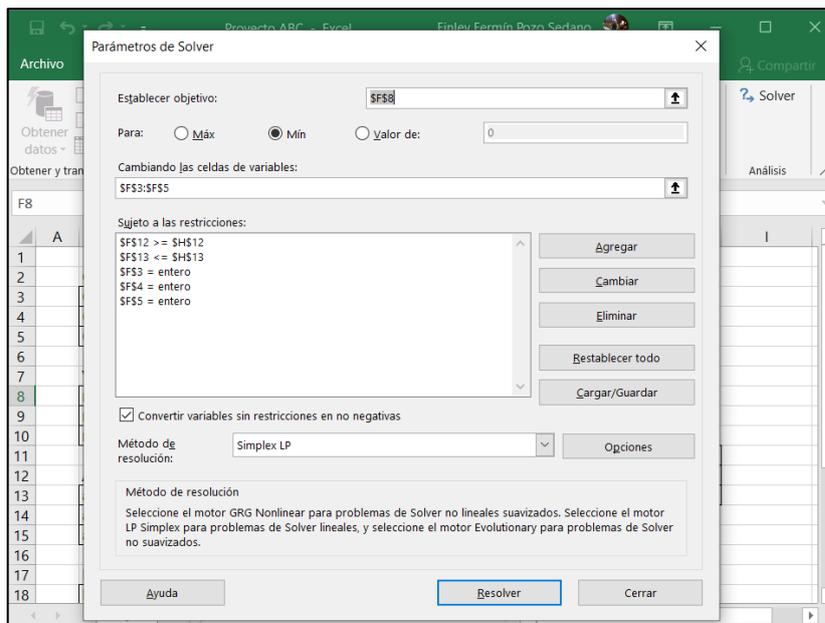


Figura 4.18. Función objetivo y restricciones ingresadas en el software Ms Excel – SOLVER.

Fuente: Elaboración Propia

Al presionar RESOLVER se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.19. (de color fuente rojo), el cual nos muestra la cantidad de equipos de cada modelo y la función objetivo optimizada.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		Costo Horario			Variables de Decisión:				
3		C1 (CS54 B) =	25.00		X1 (CS54 B) =	3.00			
4		C2 (CS56 B) =	35.00		X2 (CS56 B) =	0.00			
5		C3 (CS64 B) =	50.00		X3 (CS64 B) =	0.00			
6									
7		Velocidad de Producción			Función Objetivo:				
8		r1 (CS54 B) =	71.88		Z =	75.00			
9		r2 (CS56 B) =	80.87						
10		r3 (CS64 B) =	92.42		Restricciones:				
11							Izquierda	Signo	Derecha
12		Área de Trabajo de Equipo		N°01	215.65218	>=			210.00
13		a1 (CS54 B) =	192.32	N°02	576.9717	<=			7020.00
14		a2 (CS56 B) =	192.45						
15		a3 (CS64 B) =	192.45						
16									
17		Demanda de Producción							
18		R (Proyecto) =	210.00						
19									
20		Área de Proyecto							
21		A (Proyecto) =	7020.00						
22									
23									

Figura 4.19. Solución del problema de optimización de equipos de compactación Proyecto ABC en Ms Excel – SOLVER.

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Función objetivo optimizada (USD/h):

$$Z = 75.00$$

- Cantidad y tipo de equipos de compactación (Unidades):

- $x_1$  (CS54 B): 3.00
- $x_2$  (CS56 B): 0.00
- $x_3$  (CS64 B): 0.00

Con la solución brindada por el Ms Excel SOLVER se puede confirmar el resultado obtenido por la aplicación *OptimiAPP*.

#### 4.8. RESUMEN

En este capítulo se ha realizado la aplicación de los fundamentos teóricos y modelamiento matemático expuestos en los capítulos II y III a fin de determinar la solución óptima al problema de dimensionamiento de equipos de compactación. Así mismo, se ha desarrollado la forma en la que fue programada la aplicación *OptimiAPP* en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) Android Studio, plataforma elegida por su principal ventaja: el desarrollo de aplicaciones para móviles, de esa forma se puede tener mayor versatilidad en el uso de nuestro modelo desde la comodidad del teléfono celular que actualmente empleamos para comunicarnos, entre otros.

El producto que ofrece esta aplicación, es la optimización (minimización en nuestro caso) de la flota de maquinaria de compactación, representados por  $x_i$  para cumplir el objetivo del proyecto con las condiciones técnicas y el plazo establecidas; así como también la función del costo optimizada  $Z$  luego de reemplazar la flota con los costos de alquiler de cada equipo seleccionado (en USD/h).

Los resultados determinados por nuestra aplicación fueron verificados mediante la ejecución del software Microsoft Excel – SOLVER, un complemento del software principal que en la versión 2019 permite resolver problemas con un número ilimitado de variables y restricciones de manera versátil y sencilla.

## CAPÍTULO V: APLICACIÓN DEL MODELO EN LA OBRA LÍNEA AMARILLA

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En esta parte de la investigación se presenta la aplicación del modelo de optimización empleando los datos de la obra Línea Amarilla, antes conocido como Vía Parque Rímac, proyecto emblemático de la ciudad de Lima ejecutado entre los años 2009 a 2018, pasando por dos concesiones con sus respectivas empresas contratistas.

Se comenzará por exponer los datos de entrada referentes al proyecto y a los equipos disponibles, luego de ello, se empleará la aplicación *OptimiAPP* desarrollada en el anterior capítulo a fin de optimizar la flota de maquinaria de compactación a utilizar en los frentes 6.1 y 4.2 del proyecto Línea Amarilla, obteniendo como resultado la cantidad y tipo de rodillos a utilizar a fin de completar el trabajo de relleno controlado para la construcción de la autopista.

### 5.2. PROYECTO LÍNEA AMARILLA

El proyecto Línea Amarilla comprende la construcción de una autopista de doble carril de 25 kilómetros de extensión, en donde 16 kilómetros de la obra se desarrollan en la ciudad de Lima, desde el Trébol de Javier Prado (Surco) hasta el Óvalo Habich (San Martín de Porres), los 9 kilómetros se extienden en el Callao, desde el puente Huáscar hasta la avenida Morales Duárez (en el límite Lima-Callao).

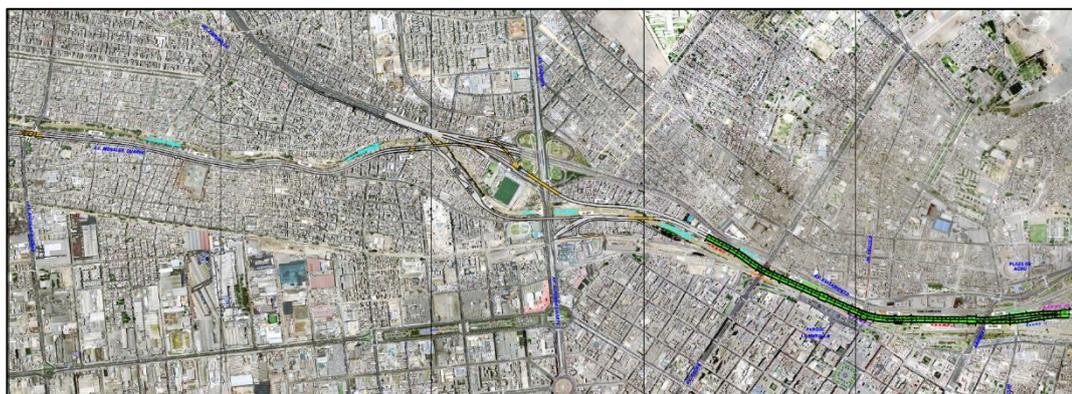


Figura 5.1. Mapa del Proyecto Línea Amarilla<sup>37</sup>.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>37</sup> Presenta plano A3 en el Anexo N° 04.

Como obras más resaltantes, el proyecto incluye un túnel de 1.80 kilómetros debajo del río Rímac y la construcción de 13 viaductos que ofrecen una nueva propuesta de vías rápidas de traslado de la zona este a oeste de la ciudad y viceversa.

### 5.2.1. Actividades Incidentes en Costo

Con el fin de realizar la mejora del proceso de ejecución del proyecto, debemos primero clasificar las actividades que se realizarán a lo largo de la obra en base a su metrado y costo para luego, en base a ello, elegir cuál o cuáles deberán ser materia de replanteamiento y optimización.

#### 5.2.1.1. Clasificación de Actividades

Para esto se trabajará con el presupuesto, se determinan qué actividades entran en la clasificación en base al potencial beneficio económico que representa su optimización. A diferencia de los trabajos ejecutados por nosotros propiamente, el trabajo de las empresas subcontratistas no serán materia de esta clasificación debido a que poseen un contrato aparte con un monto y plazo de ejecución definido con el contratista principal, es decir, con nosotros; a pesar de que su mejora sí representa un impacto positivo.

En la tabla 5.1. se muestran las actividades que serán parte de la elaboración de la herramienta según incidencia en el costo.

Como se observa, no se considerarán las partidas de Base y Sub-Base Granular debido a que al ser actividades que se realizan casi al finalizar la construcción de la autopista, estos se ejecutan con los equipos compactadores remanentes o que ya hayan realizado el trabajo de compactación; por otro lado, tampoco se considerarán las partidas de Riego de Liga ni Imprimación porque no son incidentes en costo, representan un porcentaje menor de la colocación de la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC).

Tabla 5.1. Determinación de partidas a considerar en ambos frentes en la clasificación Pareto.

ÍTEM	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD MEDIDA	POTENCIAL OPTIMIZACIÓN
Tablero				
1.00	203.01	Concreto Premezclado f'c=280 kg/cm2	m3	Si
2.00	203.01	Muro New Jersey Lateral	ml	Si
3.00	301.01	Mezcla Asfáltica en Caliente MAC-2	m3	Si
4.00	301.02	Imprimación Asfáltica	m2	No
5.00	301.02	Acero Corrugado F'y=4200 kg/cm2	Kg	Si
6.00	301.02	Encofrado Plano Visto	m2	Si
7.00	301.02	Pre-Losas	m2	Si
8.00	301.02	Junta tipo Transflex 1300	ml	Si
9.00	301.02	Prueba de Carga	glb	No
Accesos				
1.00	201.02	Relleno de Material Granular	m3	Si
2.00	301.02	Base Granular	m3	No
3.00	202.01	Sub-Base Granular	m3	No
4.00	202.01	Imprimación Asfáltica	m2	No
5.00	202.01	Riego Ligante	m2	No
6.00	202.01	Mezcla Asfáltica en Caliente MAC-1	m3	Si
7.00	202.01	Mezcla Asfáltica en Caliente MAC-2	m3	Si
8.00	202.01	Tierra Armada	m3	Si

Fuente: Elaboración Propia

### 5.2.1.2. Elección de la Partida a Optimizar

Como es usual en toda planificación de obra, a fin de determinar la partida a optimizar se usará la herramienta de “Clasificación de Pareto<sup>38</sup>”, teniendo en cuenta el monto presupuestado para cada una. Nos ayuda a determinar visualmente qué actividades representarán un beneficio en costo y plazo al ser optimizadas.

- Viaducto 4.2

Ahora, en la tabla 5.2. se asignan los costos asociados a la cantidad a ejecutar de cada partida y se ordenan de acuerdo a ello, de mayor a menor. Esto para el viaducto 4.2.

<sup>38</sup> Clasificación de Pareto: Clasifica a las actividades de un proyecto, de acuerdo a un criterio específico (por costo, plazo, materiales críticos, etc.) en dos grupos del 80% y 20%, a fin de determinar cuáles son los más importantes e incidentes en la ejecución. La herramienta está basada en el principio de Pareto, desarrollado por Vilfredo Pareto (1848-1923), ingeniero y sociólogo italiano.

Tabla 5.2. Clasificación de partidas para el viaducto 4.2.

ITEM	DESCRIPCIÓN	Ppto Jun-Dic 17 (USD)	Incidencia (%)	Acumulado (USD)	Acumulado (%)	Pareto (%)
1.00	Pre-Losas	128,695.53	23%	128,695.53	23%	80%
2.00	Muro New Jersey Lateral	104,388.85	18%	233,084.38	41%	
3.00	Relleno de Material Granular	88,215.63	16%	321,300.01	57%	
4.00	Encofrado Plano Visto	60,482.99	11%	381,783.00	67%	
5.00	Acero Corrugado F'y=4200 kg/cm2	48,023.56	8%	429,806.56	76%	
6.00	Junta tipo Transflex 1300	42,371.92	7%	472,178.48	83%	20%
7.00	Tierra Armada	35,744.33	6%	507,922.80	90%	
8.00	Concreto Premezclado f'c=280 kg/cm2	33,969.46	6%	541,892.27	96%	
9.00	MAC-2 para Tablero	14,847.33	3%	556,739.59	98%	
10.00	MAC-1 para Acceso	5,134.04	1%	561,873.63	99%	
11.00	MAC-2 para Acceso	5,042.33	1%	566,915.97	100%	

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo ya la clasificación de partidas del viaducto 4.2 se muestra a continuación el diagrama de Pareto.

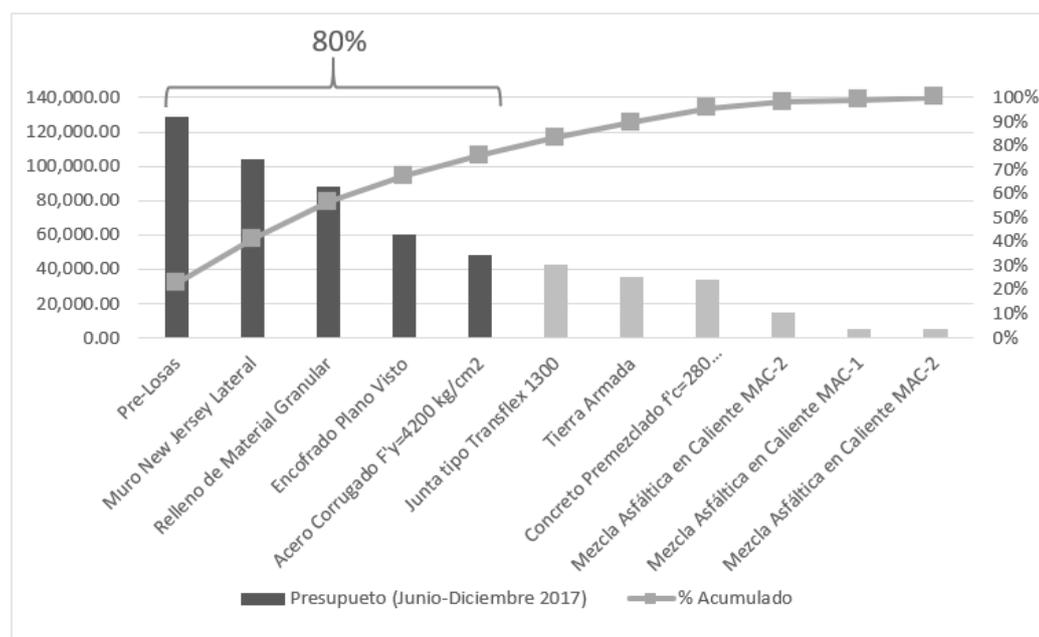


Figura 5.2. Diagrama de Pareto para el Viaducto 4.2.

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en el diagrama, el relleno de material granular para la construcción del muro de tierra armada es la tercera partida con mayor incidencia en el presupuesto. Por lo que, para fines de esta tesis, se elegirá la actividad de relleno de material granular como objeto de optimización. De la misma forma se hace necesaria la implementación de un proceso de optimización de la colocación de prelosas en el viaducto a montar y la construcción de los muros New Jersey, al ser las primeras actividades incidentes, y esto puede dar pie a una nueva investigación sobre tal tema.

Veamos ahora la composición del precio unitario de la actividad de relleno controlado según el presupuesto base.

Tabla 5.3. Costo unitario por partida del relleno para el viaducto 4.2.

FRENTE	DESCRIPCIÓN	RECURSO	PRECIO UNITARIO	PORCENTAJE	PRECIO UNITARIO TOTAL
Viaducto 4.2	Relleno	Material Granular	4.50	28%	16.20 USD/m3
		Mano de Obra	2.90	18%	
		Rodillos	3.50	22%	
		Motoniveladora	1.80	11%	
		Camión Cisterna	0.50	3%	
		Otros	3.00	19%	

Fuente: Elaboración Propia

Sabemos que es la partida de relleno controlado la que será materia de optimización, pero para determinar qué recurso se debe optimizar analizaremos el cuadro de la tabla 5.3.

Vemos que los precios asociados al material son estables dentro del plazo de ejecución, invariables; por otro lado, optimizar la mano de obra no es tan factible pues la cantidad de cuadrillas que se asignaron a la partida tiene un ratio histórico de producción y, al ser un factor netamente humano, puede sufrir variaciones en el tiempo; entonces se concluye que la optimización debe estar dirigida a los equipos pues son los principales actores en la producción, específicamente los rodillos compactadores, por lo que es importante determinar la cantidad y tipo de cada uno de ellos. Con respecto a la motoniveladora como a la cisterna de agua, su dimensionamiento no demanda un análisis exhaustivo.

- Viaducto 6.1

Debido a que son estructuras similares y, según la ingeniería del proyecto, poseen los mismo componentes y estructuras a construir, las actividades citadas en la tabla 5.1. también serán las que se considerarán para elaborar la clasificación de partidas para el viaducto 6.1.

Tabla 5.4. Clasificación de partidas para el viaducto 6.1.

ITEM	DESCRIPCIÓN	Ppto Jun-Dic 17(USD)	Incidencia (%)	Acumulado (USD)	Acumulado (%)	Pareto (%)
1.00	Relleno de Material Granular	290,658.91	25%	290,658.91	25%	80%
2.00	Pre-Losas	238,237.74	21%	528,896.65	46%	
3.00	Tierra Armada	157,779.89	14%	686,676.54	59%	
4.00	Encofrado Plano Visto	118,601.24	10%	805,277.78	70%	
5.00	Acero Corrugado F'y=4200 kg/cm2	94,169.50	8%	899,447.28	78%	
6.00	Muro New Jersey Lateral	67,659.44	6%	967,106.73	84%	20%
7.00	Concreto Premezclado f'c=280 kg/cm2	66,610.80	6%	1,033,717.53	89%	
8.00	Junta tipo Transflex 1300	57,039.12	5%	1,090,756.65	94%	
9.00	MAC-2 para Tablero	29,113.93	3%	1,119,870.58	97%	
10.00	MAC-1 para Acceso	19,069.11	2%	1,138,939.68	98%	
11.00	MAC-2 para Acceso	18,728.79	2%	1,157,668.47	100%	

Fuente: Elaboración Propia

Con los datos que nos brinda la clasificación de actividades, procedemos a elaborar el diagrama de Pareto; esto, como se mencionó, facilitará el estudio de las actividades con mayor presupuesto que deberán ser sometidas a mejorar u optimizar en su respectivo proceso de construcción.

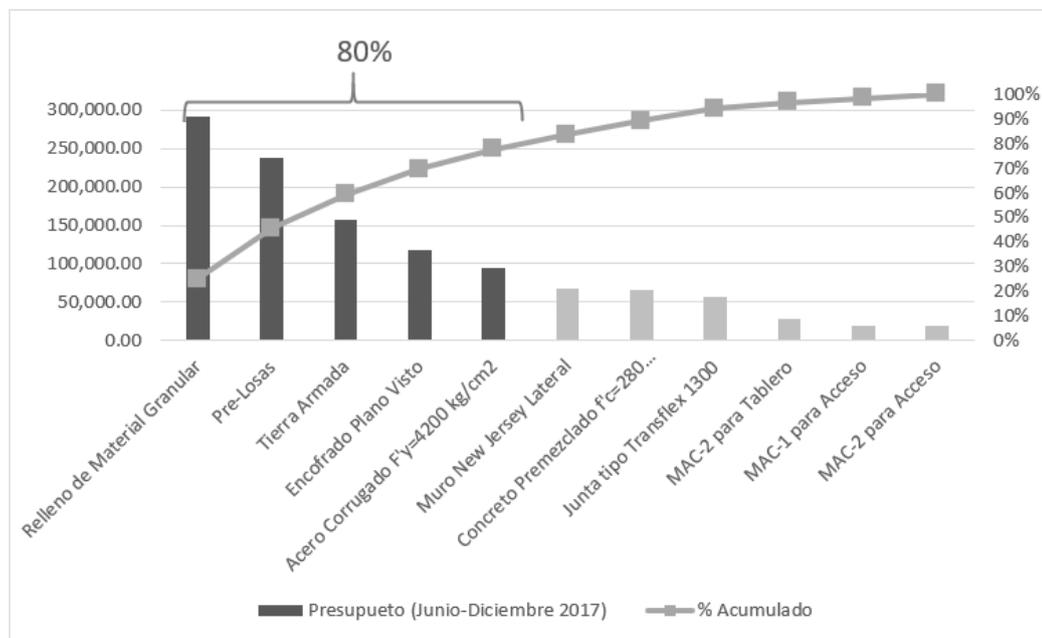


Figura 5.3. Diagrama de Pareto para el viaducto 6.1.

Fuente: Elaboración Propia

Del diagrama de la figura 5.3. se observa que el relleno de material granular pasa a ser la actividad con mayor incidencia en el presupuesto, por lo que debe ser materia de optimización para llegar al objetivo de culminar el proyecto con la rentabilidad, no solo esperada, sino con una mejor.

Veamos ahora la composición del precio unitario por partida presupuestada para el relleno de material granular.

Tabla 5.5. Costo unitario por partida del relleno para el viaducto 6.1.

FRENTE	DESCRIPCIÓN	RECURSO	PRECIO UNITARIO	PORCENTAJE	PRECIO UNITARIO TOTAL
Viaducto 6.1	Relleno	Material Granular	4.50	25%	18.20 USD/m3
		Mano de Obra	2.90	16%	
		Rodillos	3.50	19%	
		Motoniveladora	1.80	10%	
		Camión Cisterna	0.50	3%	
		Otros	5.00	27%	

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en la tabla 5.5. que al igual que el viaducto 4.2, la oportunidad de mejora en el proceso de compactación podrá mejorar la rentabilidad en el costo total de la partida de relleno.

### 5.2.2. Situación Inicial del Proyecto

- Viaducto 4.2

Este frente de trabajo ya estaba en marcha cuando se realizó la implementación de nuestra herramienta. Según el plan maestro de obra, la partida de relleno de material granular debería tener un avance semanal de 1800 m<sup>3</sup> compactados y un plazo de ejecución de 10 semanas. En el campo, se tenía un déficit marcado que veremos a continuación.

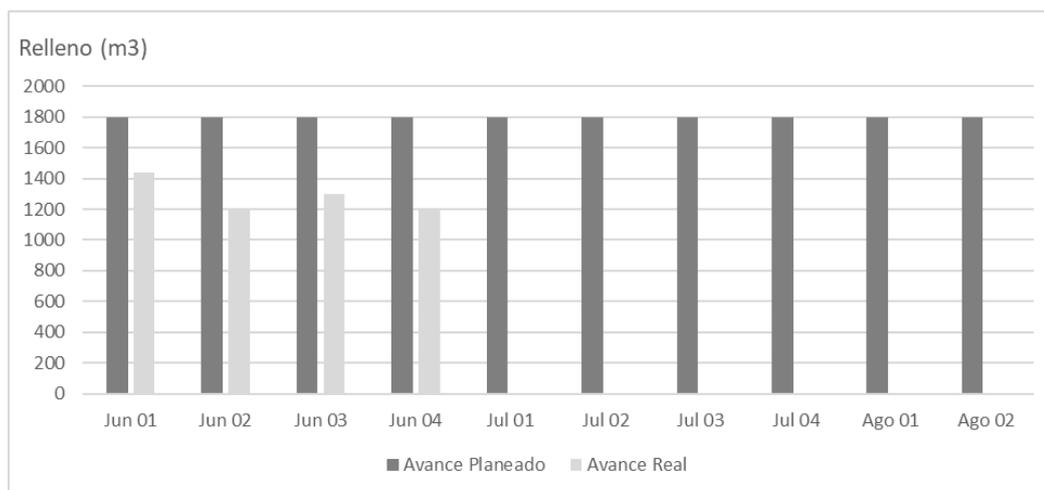


Figura 5.4. Avance planeado vs. avance real de relleno para el Viaducto 4.2

Fuente: Elaboración Propia

La causa de incumplimiento en la entrega de material compactado se debía principalmente a una errónea asignación del equipo de compactación. La velocidad de producción no era suficiente para cubrir la demanda, entre otras; por lo que las acciones correctivas, entre ellas la optimización planteada en esta investigación, se realizó desde la primera semana de junio en adelante.

- Viaducto 6.1

A diferencia del frente anterior, este viaducto estaba en la etapa de planificación, por lo que la optimización planteada fue desde el inicio de ejecución. Los detalles lo veremos en el desarrollo de este capítulo.

### 5.2.2.1. Dimensionamiento Convencional de Maquinaria

El estado del arte del dimensionamiento de maquinaria para los trabajos de compactación es relativamente conocido y se reduce a una simple deducción aritmética en la que solo consideran dos tipos de equipos, el rodillo de 10 t y el de 14 t, más allá del tipo de suelo a compactar pues para los trabajos de relleno controlado, sobre todo en carreteras, es usual usar material semicohesivo y granular. El detalle en la tabla siguiente.

Tabla 5.6. Detalle de dimensionamiento convencional de maquinaria de compactación.

Descripción	Velocidad de producción por jornada (m <sup>3</sup> compactados/hora)	Forma de dimensionar
Rodillo 10 t	200	$\# \text{ Equipos} = \frac{\text{Metrado total}}{\text{Vel. Prod.}(R_{10t} \text{ ó } R_{14t})}$
Rodillo 14 t	300	

Fuente: Elaboración Propia

Por lo que el objetivo de esta tesis es que se tenga una herramienta analítica y que considere los factores influyentes para que se realice un buen dimensionamiento de equipos de compactación.

## 5.3. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

En esta parte, determinaremos las características del proyecto que serán ingresadas al programa como parte de los datos de entrada que solicita para realizar la corrida.

### 5.3.1. Viaducto 4.2

#### 5.3.1.1. Lugar y Plazo de Ejecución

- Lugar de Ejecución: Distrito del Rímac, Lima / msnm: 200.00

Esta primera estructura se encuentra ubicada paralela a la Vía de Evitamiento, entre los kilómetros 5.50 y 6.00 de la Vía Expresa Línea Amarilla, en la zona norte de la ciudad de Lima. Todo este tramo está conformado por un viaducto elevado y su correspondiente rampa constituida por un muro de tierra armada en el siguiente detalle:

Tabla 5.7. Conformación del Viaducto 4.2.

Detalle	Tipo de Estructura	Extensión (m)
Viaducto Elevado	Estructura Metálica para Montaje	120.00
Rampa de Conexión	Muro de Tierra Armada	130.00

Fuente: Elaboración Propia

Específicamente, es un viaducto que nace elevado desde el puente Santa María y conecta la vía de oeste a este, con dirección a San Juan de Lurigancho. Se extiende por la carretera Panamericana Norte (Ruta Nacional PE-1N)<sup>39</sup> a la altura del trébol de Caquetá del distrito del Rímac, como un viaducto elevado con acceso de la nueva autopista Línea Amarilla.



Figura 5.5. Ubicación del viaducto 4.2 del Proyecto Línea Amarilla.

Fuente: Elaboración Propia

- Plazo de ejecución: 06 semanas / Jornadas por día: 02

El plazo de ejecución de este frente era el de 10 semanas, desde el 02 de junio hasta el 14 de agosto del 2017; pero debido a que ya se había arrancado con la ejecución del frente en la fecha indicada y, luego del análisis de causas en las que arrojaba un incumplimiento en el avance semanal del frente se le sometió a un replanteamiento de obra, en el que solo nos quedaban 6 semanas de ejecución. Con turnos de trabajo diurno y nocturno.

<sup>39</sup> Denominación con la que se identifica a la carretera Panamericana Norte. Forma parte de la Carretera Panamericana, recorrido que inicia en Lima hasta la frontera del Ecuador.

### 5.3.1.2. *Metrado a Ejecutar*

- Metrado: 10'800.00 metros cúbico compactados

El metrado total del frente es 17'550.00 metros cúbicos, de los cuales ya fueron ejecutados 6'750.00 y la optimización comienza desde ahí.

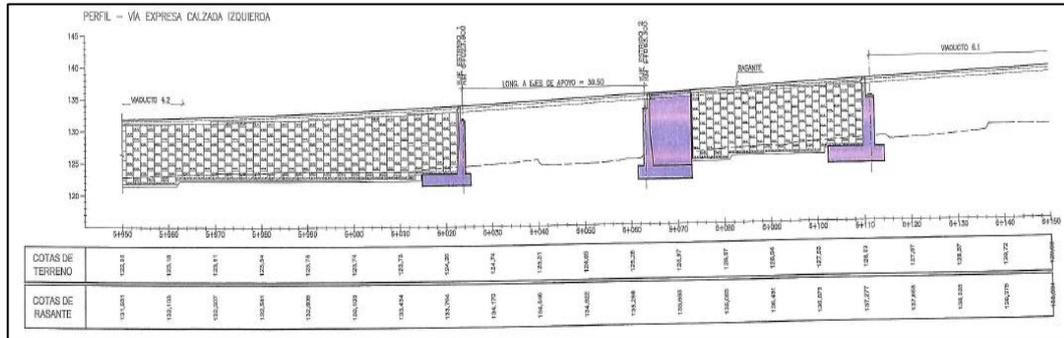


Figura 5.6. Vista de perfil del viaducto 4.2 del proyecto.

Fuente: Lamsac (2016)

### 5.3.1.3. *Condiciones Geotécnicas*

- Tipo de material a emplear: Material semicohesivo

Si bien el material indicado en la ingeniería es un suelo granular (% pasa = 20 %), el ensayo de límites de Atterberg del material de la cantera aprobada (cantera Petramax) para el abastecimiento arrojó un IP = 11 y un LL = 40, por lo que se considerará al tipo de suelo como semicohesivo para ingresar al programa, que en teoría demanda mayor esfuerzo para llegar a la compactación indicada que un suelo granular.

- Porcentaje de compactación: 95% del Proctor Modificado

Es el porcentaje mínimo que demanda la ingeniería como condición de compactación del relleno granular.

### 5.3.1.4. *Condiciones de Espacio*

- Área de proyecto: 1'780.00 metros cuadrados de área de trabajo

Como se ha definido en la parte teórica, el área de proyecto está relacionada con la superficie que se dispone para realizar la compactación, el muro tiene una

longitud de 130.00 metros con un ancho de calzada de 13.50 m; en la figura 5.7., es toda la parte del muro de tierra armada sombreado con azul.



Figura 5.7. Área de proyecto del viaducto 4.2.

Fuente: Elaboración Propia

### 5.3.1.5. Productividad en el Proceso Constructivo

- Eficiencia: 0.85

La eficiencia es determinada por los factores correspondientes al aprovechamiento del tiempo de trabajo efectivo, habilidad del operador y condiciones de campo. El tiempo destinado para la compactación no se ve interrumpida por obstáculos físicos en la zona de compactación, se consideran operadores calificados para el puesto y el frente puede ser compactado con vibración alta y baja pues no existen construcciones vulnerables a su alrededor.

- Horas efectivas de trabajo: 5.00 horas por jornada

Las horas efectivas vienen extraídas del plan de producción, en el que se considera el tiempo de actividades como: llegada de material, esparcimiento de agregado, control topográfico y plantillado, compactación, perfilado y control de calidad de la capa compactada. Para este viaducto se consideró la mitad de la jornada como trabajo efectivo del rodillo debido a que se debe alcanzar el nivel de relleno avanzado antes de la optimización ajustado luego por la carta balance CB.

### 5.3.2. Viaducto 6.1

#### 5.3.2.1. Lugar y Plazo de Ejecución

- Lugar de Ejecución: Distrito del Rímac, Lima / msnm: 200.00

Se encuentra ubicada bordeando el margen derecho del río Rímac, en la zona de Huascarán, del distrito del Rímac, entre los kilómetros 6.00 y 6.50. Este tramo posee un viaducto elevado que cruza la avenida Alfonso Ugarte, a la altura del puente del Ejército y posee una rampa constituida por un muro de tierra armada de dos tramos denominados sector 01 y 02.

Tabla 5.8. Conformación del Viaducto 6.1.

Detalle	Tipo de Estructura	Extensión (m)
Viaducto Elevado	Estructura Metálica para Montaje	160.00
Rampa de Conexión 01 – Sector 01	Muro de Tierra Armada	205.00
Rampa de Conexión 02 – Sector 02	Muro de Tierra Armada	50.00

Fuente: Elaboración Propia

Este viaducto sigue el flujo de vehículos que entrega el viaducto 4.2 con dirección al distrito de San Juan de Lurigancho, teniendo como fin el inicio de la boca del túnel construido por debajo del río Rímac.



Figura 5.8. Ubicación del Viaducto 6.1 del Proyecto Línea Amarilla.

Fuente: Elaboración Propia

- Plazo de ejecución: 06 semanas / Jornadas al día: 02

El plazo de ejecución asignado para ambos sectores es de 06 semanas e inician desde el 14 de agosto hasta el 23 de setiembre del 2017. Se considera jornada de trabajo diurno y nocturno por ser la ruta crítica del proyecto.

### 5.3.2.2. *Metrado a Ejecutar*

- Sector 01

- Metrado: 13'660.00 metros cúbicos compactados

Este primer sector es el de mayor extensión y es el que da inicio a la rampa de acceso para entrar al viaducto elevado.

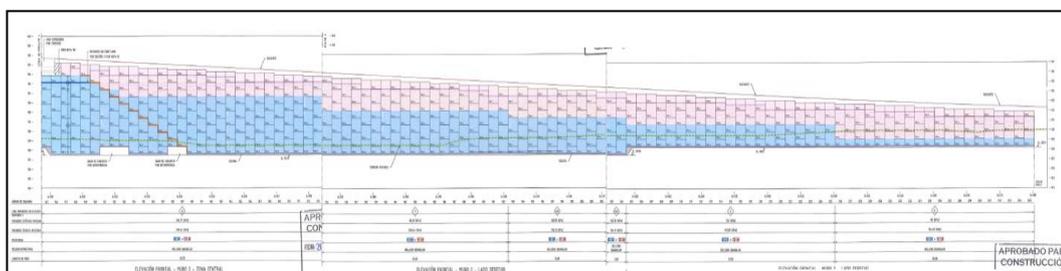


Figura 5.9. Vista de perfil del sector 01 del viaducto 6.1.

Fuente: Lamsac (2016)

- Sector 02

- Metrado: 6'412.00 metros cúbicos compactados

Este sector se encuentra aislado por el estribo del viaducto elevado y el túnel peatonal que lo separa del sector 01. Es una “torre de relleno estructural” que debe ser ejecutada con los equipos adecuados para abastecimiento de material y compactación.

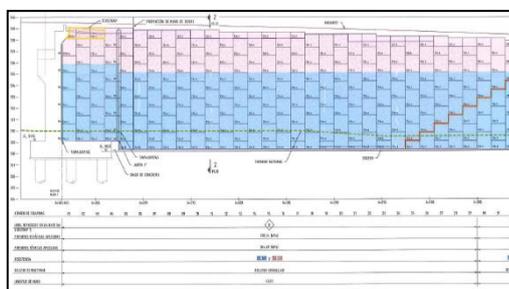


Figura 5.10. Vista de perfil del sector 02 del viaducto 6.1.

Fuente: Lamsac (2016)

### 5.3.2.3. Condiciones Geotécnicas

- Tipo de material a emplear: Material semicohesivo

El material indicado en la ingeniería tiene las mismas condiciones geotécnicas que el empleado en el viaducto 4.2. (material granular), la cantera de abastecimiento será la misma (cantera Petramax), por lo que los límites de Atterberg se mantienen (% pasa = 20%, IP = 11 y LL = 40) y la consideración como material semicohesivo para la optimización también. Para ambos sectores.

- Porcentaje de compactación: 95% del Proctor Modificado

Es el porcentaje mínimo que demanda la ingeniería como condición de compactación del suelo para este muro de tierra armada. Para ambos sectores.

### 5.3.2.4. Condiciones de Espacio

- Sector 01

- Área de proyecto: 2'770.00 metros cuadrados de área de trabajo

Posee una longitud de 205.00 m con un ancho de 13.50 m, en la figura 5.11. se muestra la superficie sombreada en azul. El tramo va desde el túnel peatonal hasta tomar la rasante de vía que conecta al túnel debajo del río Rímac.

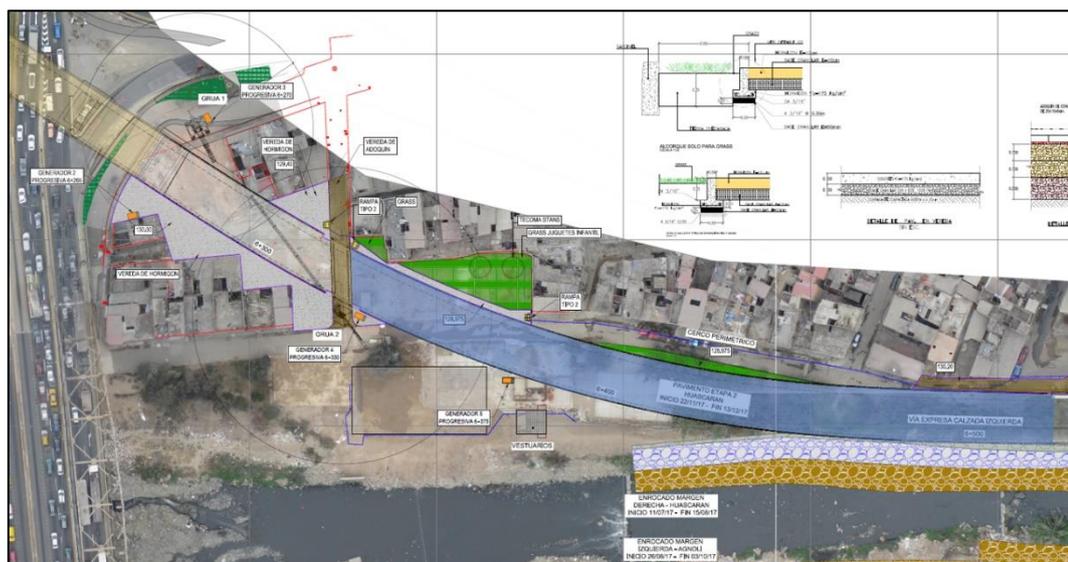


Figura 5.11. Área de proyecto del sector 01 del viaducto 6.1.

Fuente: Elaboración Propia



- Sector 02
  - Eficiencia: 0.50

La particularidad de este sector radica en el espacio disponible para la compactación, los accesos para el ingreso del material granular y las placas que confinan el relleno. En la etapa de planeamiento, a fin de superar estas restricciones, se dispuso el uso de un equipo con faja transportadora telescópica incorporada Telebelt TB130 Putzmeister<sup>40</sup> y dos torres grúa, una Potain AD 40 (R = 30.00 m) y la otra una Potain MC 68B #79 (R = 50.00 m). Con ello se consideró una eficiencia del equipo de un 50% debido a que no podrá usar la vibración alta hasta llegar a la mitad de altura total de crecimiento de este sector, es decir, tendrá que compactar en vibración baja hasta crecer 4.00 m verticalmente, luego podrá usar la vibración alta hasta completar todo el sector (8.50 m en total de altura).

- Horas efectivas de trabajo: 6.50 horas por jornada

Se estimaron estas horas debido a que aproximadamente la mitad de la jornada (10 h) se invertirán en el uso de la faja transportadora y un minicargador, ya no se podrá usar una motoniveladora por las dimensiones del área de trabajo, y que realizará el trabajo de dispersar y plantillar (nivelar la capa a compactar con la topografía) a fin de que los equipos a dimensionar puedan realizar la compactación.

#### 5.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE COMPACTACIÓN

En esta parte, se determinarán las características asociadas a los equipos disponibles con los que cuentan los proveedores de equipos del proyecto para la ejecución del trabajo de compactación y deberán ser coherentes con los requisitos técnicos o la ingeniería que cada muro de tierra armada demanda.

Es importante resaltar el hecho de que existen equivalencias entre una marca de maquinaria a otra, si bien es cierto tomamos a Caterpillar como punto de referencia, en el mercado existen otras marcas con modelos o series que compiten con esta marca, tales como la marca BOMAG o HAMM con sus modelos de

---

<sup>40</sup> Putzmeister: Fabricante alemán de bombas de concreto y de equipos de traslado de materiales como fajas transportadoras entre otros. Fundado en 1958.

equipos compactadores. Y los precios de alquiler de los modelos que compiten entre sí son similares.

#### 5.4.1. Dimensiones de los Equipos

- Equipos Disponibles: CS54 B / CS56 B / CS64 B

Según la información del área de Equipos del proyecto, esos eran los equipos disponibles del proyecto. Se contaba con una amplia variedad debido a que el proyecto se desarrollaba en una zona céntrica de la capital peruana. Las dimensiones son las siguientes (extraído de la tabla 3.3.):

Tabla 5.9. Determinación del área de trabajo del equipo compactador.

Modelo	Ancho (m)	Largo (m)	Distancia Lateral (m)	Distancia Frontal (m)	Área de trabajo del equipo a (m <sup>2</sup> /hm)
CS54B	2.13	5.85	5.00	5.00	192.32
CS56B	2.13	5.86	5.00	5.00	192.45
CS64B	2.13	5.86	5.00	5.00	192.45

Fuente: Elaboración Propia

Dichos equipos ya se encuentran cargados en el programa, por lo que solo es necesario seleccionarlos del catálogo de *Equipos*. Aplica para ambos frentes de trabajo.

#### 5.4.2. Objetivo Geotécnico

- Tipo de material a emplear: Material semicohesivo
- Porcentaje de compactación solicitado: 95% del Proctor Modificado
- Número de pasadas:
  - CS54 B → 9.00 pasadas
  - CS56 B → 8.00 pasadas
  - CS64 B → 7.00 pasadas

Como se estudió en la parte teórica, los equipos realizan la compactación del suelo a través de pasadas por la superficie a compactar, por lo que mientras más alto sea el porcentaje de compactación, mayor será la cantidad o número de pasadas que el equipo deberá realizar; por otro lado, mientras mayor sea la capacidad del equipo de compactación, menor será el número de pasadas que realizará con respecto a un equipo de menor capacidad, para lograr el porcentaje de

compactación requerido. En nuestro caso, en base a la oferta de equipos que se tiene, se muestran la cantidad de pasadas para el porcentaje Proctor y tipo de suelo solicitado por ambos frentes en el proyecto.

#### 5.4.3. Operatividad

- Ancho Efectivo de Compactación:  $2.13 - 0.15 = 1.98$  m
- Traslape de Compactación: 0.15 m

En esta parte evaluaremos el traslape que el equipo realiza cuando compacte de una franja a otra. Los operadores de equipo realizan un traslape de entre 0.25-0.10 m entre franjas, a fin de asegurar al 100% la compactación de toda la superficie a compactar. Los actuales equipos de compactación poseen el sistema de sensor de compactación, que permite al operador saber si cierta superficie ya fue pasada y repasada, para fines prácticos se considerará un traslape de 0.15 m, que, restados al ancho total del tambor de compactación, son los que se muestran. Acotar que todos equipos disponibles tienen el mismo ancho de tambor igual a 2.13 m.

#### 5.4.4. Costo

En esta parte se calculará el costo horario de los equipos de compactación con las fórmulas y relaciones revisadas en la parte teórica. Estas cantidades son necesarias para la optimización pues son parte de la función objetivo:

#### ALQUILER HORARIO DE LOS RODILLOS COMPACTADORES<sup>41</sup>

##### DATOS GENERALES:

	Rodillo Compactador Liso			
- Máquina	:	CS54B	CS56B	CS64B
- Modelo	:	CS54B	CS56B	CS64B
- Peso	:	10.55 t	11.50 t	12.36 t
- Vida Económica (N)	:	5 años	5 años	5 años
- Vida Económica (Ve)	:	10,000 horas	10,000 horas	10,000 horas

<sup>41</sup> Alquiler horario del rodillo liso compactador según Capeco (Ramos, 2012).

## CONDICIONES ECONÓMICAS:

- Valor de Maquinaria Importada	:	90,000.00 USD	130,000.00 USD	147,000.00 USD
- Valor de Maquinaria Nacional <sup>42</sup>	:	S/ 303,930.00	S/ 439,010.00	S/ 496,419.00
- Tipo de Cambio <sup>43</sup>	:	3.377	3.377	3.377
- Interés (I)	:	10%	10%	10%
- Seguros (s)	:	5%	5%	5%
- Valor de Rescate	:	25%	25%	25%
- Costo HH de Operador <sup>44</sup>	:	S/ 21.21	S/ 21.21	S/ 21.21

## COSTOS VARIABLES:

- Combustible	:	Petróleo	Petróleo	Petróleo
- Consumo (galón/h)	:	3.00	3.60	4.20
- Precio de Combustible <sup>45</sup> (S/ por galón)	:	9.87	9.87	9.87
Lubricantes <sup>46</sup>				
- Aceite para Motor (galón/h)	:	0.04	0.05	0.07
Precio (S/ por galón)	:	40.09	40.09	40.09
- Aceite Hidráulico (galón/h)	:	0.004	0.005	0.007
Precio (S/ por galón)	:	49.29	49.29	49.29
- Aceite Transmisión (galón/h)	:	0.004	0.005	0.007
Precio (S/ por galón)	:	47.31	47.31	47.31
- Aceite del Sistema e Vibración (galón/h)	:	0.008	0.009	0.011

<sup>42</sup> Se toma como referencia el valor de mercado de los rodillos lisos vibratorios Caterpillar del año 2017.

<sup>43</sup> Tipo de cambio regular o promedio del US dólar correspondiente al año fiscal 2017. Según publicación oficial de la Superintendencia de Banca y Seguros (SBS).

<sup>44</sup> Costo Hora-Hombre (HH) de Operador de Maquinaria Pesada. Sustentado en el Anexo N° 03.

<sup>45</sup> Precio promedio del combustible en el mercado peruano para el año 2017.

<sup>46</sup> Precio promedio de lubricantes y grasa en el mercado peruano para el año 2017.

Precio (S/ por galón)	:	44.55	44.55	44.55
- Grasa (lb/h)	:	0.17	0.21	0.28
Precio (S/ por libra)	:	9.07	9.07	9.07
- Refrigerante (galón/h)	:	0.002	0.003	0.004
Precio (S/ por galón)	:	35.01	35.01	35.01
- Filtros (% de combustible + lubricante)	:	20%	20%	20%
Neumáticos				
- Vida Útil	:	4,000 horas	4,000 horas	4,000 horas
- Precio	:	S/ 9,500.00	S/ 10,000.00	S/ 10,500.00

#### ANÁLISIS DEL COSTO HORARIO:

- Valor Maquinaria Nacional	:	S/ 294,300.00	S/ 425,100.00	S/ 480,690.00
- IGV (18% Año 2017)	:	S/ 52,974.00	S/ 76,518.00	S/ 86,524.20
- Valor de Adquisición (Vam)	:	S/ 347,274.00	S/ 501,618.00	S/ 567,214.20
- Valor de Rescate o Salvataje (Vs)	:	S/ 86,818.50	S/ 125,404.50	S/ 141,803.55

#### COSTO DE LA MAQUINARIA SIN OPERAR:

- Depreciación (D)	:	S/ 26.05	S/ 37.62	S/ 42.54
- Interés (I)	:	S/10.42	S/15.05	S/17.02
- Seguros y Almacenaje (S, A)	:	S/5.21	S/7.52	S/8.51
- Costo Horario de la Máquina sin Operar	:	S/ 41.67	S/ 60.19	S/ 68.07

#### COSTO HORARIO DE LA MAQUINARIA OPERADA:

- Costo Total de Mantenimiento y Reparación (MR)	:	S/26.05	S/37.62	S/42.54
- Combustible (Co)	:	S/29.61	S/35.53	S/41.45

- Lubricantes y grasa (L)	:	S/3.96	S/4.90	S/6.65
- Filtro (F)	:	S/6.71	S/8.09	S/9.62
- Neumáticos (LL)	:	S/2.38	S/2.50	S/2.63
- Costo de HH de Operador (OP)	:	S/ 21.21	S/ 21.21	S/ 21.21

**COSTO TOTAL DE TARIFA DE MAQUINARIA:**

- COSTOS DE POSESIÓN (D+I+S+A)	:	S/ 41.67	S/ 60.19	S/ 68.07
- COSTOS DE OPERACIÓN (MR+Co+L+F+LL+OP)	:	S/89.91	S/109.85	S/124.10
- COSTO TOTAL DE TARIFA DE MAQUINARIA (CM)	:	S/ 131.59	S/ 170.04	S/ 192.17
En US dólar	:	40.24 USD	52.00 USD	58.77 USD

Por lo tanto, el costo horario de los equipos será de S/ 131.59 o USD 40.24 para el modelo CS54 B, S/ 170.04 o USD 52.00 para el modelo CS56 B y S/ 192.17 o USD 58.77 para el modelo CS64 B. Aplica para ambos frentes del de trabajo.



Figura 5.13. Principales proveedores de equipos del proyecto Línea Amarilla.

Fuente: Elaboración Propia

## 5.5. APLICACIÓN DEL SOFTWARE

Luego de desarrollar las características de cada frente de trabajo del proyecto Línea Amarilla, ya se tiene la información necesaria para plantear y resolver el modelo matemático para la optimización de los equipos en los viaductos 4.2 y 6.1.

### 5.5.1. Viaducto 4.2

#### 5.5.1.1. Datos de Entrada del Software

Se presenta a continuación el resumen de los equipos disponible y las condiciones de proyecto para el ingreso de datos en la aplicación.

#### Viaducto 4.2

##### Equipos Ofertados

Modelo 01	:	CS54 B	
Costo Horario 01	:	40.24	USD/hm
Modelo 02	:	CS56 B	
Costo Horario 02	:	52.00	USD/hm
Modelo 03	:	CS64 B	
Costo Horario 03	:	58.77	USD/hm

##### Condiciones de Proyecto

Tipo	:	Muro de Tierra Armada	
Longitud	:	130.00	m
Ancho de Vía	:	13.50	m
Área Proyecto	:	1'780.00	m <sup>2</sup>
Volumen a Compactar	:	10'800.00	m <sup>3</sup> compactados
Plazo de Ejecución	:	36	Días
Jornadas	:	02	Jornada/Día
Horas Efectivas	:	5.00	h/Jornada
Factor de Eficiencia de Trabajo	:	0.85	Condiciones Buenas
Tipo de Suelo	:	Semicohesivo	
Porcentaje Proctor Modificado	:	95	%
Espesor de Capa	:	0.20	m
Altura del Proyecto	:	200.00	msnm

*OptimiAPP* ya posee estos equipos cargados en biblioteca, por lo que creamos de manera directa el proyecto como muestra la figura 5.14.

The image shows two side-by-side screenshots from a mobile application. The left screenshot is titled 'Agregar nuevo proyecto' and contains several input fields: 'Título' (Projecto Línea Amarilla), 'Descripción' (Viaducto 4.2), 'Espesor (cm)' (20), 'Jornadas' (2), 'Factor eficiencia' (0.85), 'Altura (msnm)' (200), 'Área proyecto (m2)' (1780), 'Relleno a compactar(m3)' (10800), 'Horas efectivas' (5), 'Plazo de ejecución (días)' (36), 'Tipo suelo' (Semicohesivo), and 'Porcentaje proctor' (95.0). A blue 'AGREGAR' button is at the bottom. The right screenshot is titled 'Detalle del proyecto' for 'Viaducto 4.2' and displays the same data in a structured layout. It includes a blue 'AGREGAR EQUIPO' button.

Figura 5.14. Datos de entrada del viaducto 4.2. en la aplicación y pantalla de detalle.

Fuente: Elaboración Propia

### 5.5.1.2. Proceso de Ejecución del Software

Se inicia al seleccionar los modelos ofertados por el proveedor de equipos a fin de que el programa pueda hallar la velocidad de producción de cada modelo.

The image shows a screenshot of the 'Agrega equipos a tu proyecto' screen. It lists five equipment models with checkboxes, each showing its name, soil type, price, and efficiency. The selected models are CS54B, CS56B, and CS64B. A blue 'AGREGAR' button is at the bottom.

Modelo	Tipo de Suelo	Precio	Velocidad
<input type="checkbox"/> CS44B	Semicohesivo	\$36.0	10 pasadas
<input checked="" type="checkbox"/> CS54B	Semicohesivo	\$37.0	9 pasadas
<input checked="" type="checkbox"/> CS56B	Semicohesivo	\$38.0	8 pasadas
<input checked="" type="checkbox"/> CS64B	Semicohesivo	\$39.0	7 pasadas
<input type="checkbox"/> CS66B	Semicohesivo	\$40.0	6 pasadas
<input type="checkbox"/> CS68B			

Figura 5.15. Selección de modelos disponibles para el viaducto 4.2.

Fuente: Elaboración Propia

Luego de ello, en cada modelo seleccionado actualizamos los costos horarios de acuerdo a la oferta realizada por el proveedor de equipos del proyecto.

Proyecto Línea Amarilla Viaducto 4.2		Proyecto Línea Amarilla Viaducto 4.2		Proyecto Línea Amarilla Viaducto 4.2	
Detalle del proyecto		Detalle del proyecto		Detalle del proyecto	
Esesor (cm)	Factor eficiencia	Esesor (cm)	Factor eficiencia	Esesor (cm)	Factor eficiencia
20	0.85	20	0.85	20	0.85
Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)
200	1780.0	200	1780.0	200	1780.0
Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)	
10800.0		10800.0		10800.0	
Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo
5.0	Semicohesivo(95.0%)	5.0	Semicohesivo(95.0%)	5.0	Semicohesivo(95.0%)
Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas
36.0	2	36.0	2	36.0	2
Equipos		Equipos		Equipos	
<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>	
CS54B	CS56B	S54B	CS56B	CS64	CS56B
95.0%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%
9 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	8 pasadas
\$40.24	\$52.0	\$58.77	\$52.0	\$58.77	\$52.0
R1=93.68889	R1=105.4	R1=120.45	R1=105.4	R1=120.45	R1=105.4
<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>	

Figura 5.16. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción para el viaducto 4.2.  
Fuente: Elaboración Propia

De la figura 5.16. obtenemos los valores de la velocidad de producción para cada equipo:

- Velocidad de producción de cada equipo ofertado (m3/h):
  - $r_1$  (CS54 B) = 93.69
  - $r_2$  (CS56 B) = 105.40
  - $r_3$  (CS64 B) = 120.46

Se observa que los modelos CS54 B, CS56 B y CS64 B producirán 93.69 m3, 105.40 m3 y 120.46 m3 respectivamente por cada hora de uso efectivo, de acuerdo a las condiciones del proyecto.

### 5.5.1.3. Datos de Salida del Software

En la figura 5.17. se presenta el dimensionamiento de equipos y la función objetivo optimizada que la aplicación *OptimiAPP* realiza al viaducto 4.2.

### Resumen de la operación

Primera restricción R

$93.68889\_X1 + 105.4\_X2 + 120.457146\_X3 \geq$  30.0

Segunda restricción A

$192.3239\_X1 + 192.44525\_X2 + 192.44525\_X3 \leq$  1780.0

Función objetivo

$40.24\_X1 + 52.0\_X2 + 58.77\_X3$

**Modelo 1(CS54B):**      1.0 unidades

**Modelo 2(CS56B):**      0.0 unidades

**Modelo 3(CS64B):**      0.0 unidades

Costo de la flota (USD/h)

40.24 USD/h

ENTENDIDO

Figura 5.17. Datos de salida de la aplicación para el viaducto 4.2.

Fuente: Elaboración Propia

Se muestran los siguientes resultados:

- Función objetivo optimizada (USD/h):

$$Z = 40.24$$

- Cantidad y tipo de equipos de compactación (Unidades):

- $x_1$  (CS54 B) =            1.00
- $x_2$  (CS56 B) =            0.00
- $x_3$  (CS64 B) =            0.00

Se puede observar que para el viaducto 4.2, se debe alquilar un (01) rodillo compactador del modelo CS54 B con un alquiler de 40.24 USD/h, a fin de cumplir con el objetivo del proyecto en el plazo establecido.

## 5.5.2. Viaducto 6.1

### 5.5.2.1. Datos de Entrada del Software

Se presenta el resumen de los equipos disponible y las condiciones de proyecto para el ingreso de datos en la aplicación, tanto del sector 01 como el sector 02 del viaducto 6.1.

- Sector 01

#### Viaducto 6.1 – S01

##### Equipos Ofertados

Modelo 01	:	CS54 B	
Costo Horario 01	:	40.24	USD/hm
Modelo 02	:	CS56 B	
Costo Horario 02	:	52.00	USD/hm
Modelo 03	:	CS64 B	
Costo Horario 03	:	58.77	USD/hm

##### Condiciones de Proyecto

Tipo	:	Muro de Tierra Armada	
Longitud	:	205.00	m
Ancho de Vía	:	13.50	m
Área Proyecto	:	2'770.00	m <sup>2</sup>
Volumen a Compactar	:	13'660.00	m <sup>3</sup> compactados
Plazo de Ejecución	:	36	Días
Jornadas	:	02	Jornada/Día
Horas Efectivas	:	6.50	h/Jornada
Factor de Eficiencia de Trabajo	:	0.20	Pésimas condiciones
Tipo de Suelo	:	Semicohesivo	
Porcentaje Proctor Modificado	:	95	%
Espesor de Capa	:	0.20	m
Altura del Proyecto	:	200.00	msnm

Ahora se procede a insertar los datos en la aplicación. Reiterar que los modelos ofertados se encuentran en la biblioteca de *OptimiAPP*, por lo que se creará de manera directa el proyecto.

### Agregar nuevo proyecto

Título  
**Proyecto Línea Amarilla**

Descripción  
**Viaducto 6.1 - Sector 01**

Espesor (cm)  Jornadas

Factor eficiencia  Altura (msnm)

Área proyecto (m2)  Relleno a compactar(m3)

Horas efectivas  Plazo de ejecución (días)

Tipo suelo  Porcentaje proctor

AGREGAR

### Proyecto Línea Amarilla

Viaducto 6.1 - Sector 01

#### Detalle del proyecto

Espesor (cm)  Factor eficiencia

Altura (msnm)  Área proyecto (m2)

Volumen de relleno a compactar(m3)

Horas efectivas  Tipo suelo

Plazo de ejecución (días)  Jornadas

#### Equipos

AGREGAR EQUIPO

CALCULAR

Figura 5.18. Datos de entrada del viaducto 6.1 – sector 01 en la aplicación y pantalla de detalle.

Fuente: Elaboración Propia

- Sector 02

### Viaducto 6.1 – S02

#### Equipos Ofertados

Modelo 01	:	CS54 B	
Costo Horario 01	:	40.24	USD/hm
Modelo 02	:	CS56 B	
Costo Horario 02	:	52.00	USD/hm
Modelo 03	:	CS64 B	
Costo Horario 03	:	58.77	USD/hm

#### Condiciones de Proyecto

Tipo	:	Muro de Tierra Armada	
Longitud	:	50.00	m
Ancho de Vía	:	13.50	m
Área Proyecto	:	675.00	m2
Volumen a Compactar	:	6'412.00	m3 compactados
Plazo de Ejecución	:	36	Días
Jornadas	:	02	Jornada/Día
Horas Efectivas	:	6.50	h/Jornada

Factor de Eficiencia de Trabajo	:	0.50	Condiciones malas
Tipo de Suelo	:	Semicohesivo	
Porcentaje Proctor Modificado	:	95	%
Espesor de Capa	:	0.20	m
Altura del Proyecto	:	200.00	msnm

Ahora se insertan los datos de entrada en la aplicación. Se crea de manera directa el proyecto.

### Agregar nuevo proyecto

Título: Proyecto Línea Amarilla

Descripción: Viaducto 6.1 - Sector 02

Espesor (cm): 20 | Jornadas: 2

Factor eficiencia: 0.50 | Altura (msnm): 200

Área proyecto (m2): 675 | Relleno a compactar(m3): 6412

Horas efectivas: 6.5 | Plazo de ejecución (días): 36

Tipo suelo: Semicohesivo | Porcentaje proctor: 95.0

**AGREGAR**

### Proyecto Línea Amarilla

Viaducto 6.1 - Sector 02

#### Detalle del proyecto

Espesor (cm)	Factor eficiencia
20	0.5
Altura (msnm)	Área proyecto (m2)
200	675.0
Volumen de relleno a compactar(m3)	
6412.0	
Horas efectivas	Tipo suelo
6.5	Semicohesivo(95.0%)
Plazo de ejecución (días)	Jornadas
36.0	2

Equipos **AGREGAR EQUIPO**

**CALCULAR**

Figura 5.19. Datos de entrada del viaducto 6.1 – sector 02 en la aplicación y pantalla de detalle.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 5.5.2.2. Proceso de Ejecución del Software

- Sector 01

Seleccionamos los modelos ofertados para determinar la velocidad de producción de acuerdo a las condiciones propias del frente de trabajo.

**Agrega equipos a tu proyecto**

**CS44B**  
 Semicohesivo \$36.0  
 95.0% 10 pasadas

**CS54B**  
 Semicohesivo \$37.0  
 95.0% 9 pasadas

**CS56B**  
 Semicohesivo \$38.0  
 95.0% 8 pasadas

**CS64B**  
 Semicohesivo \$39.0  
 95.0% 7 pasadas

**CS66B**  
 Semicohesivo \$40.0  
 95.0% 6 pasadas

**CS68B**

**AGREGAR**

Figura 5.20. Selección de modelos disponibles para el viaducto 6.1 – sector 01.

Fuente: Elaboración Propia

Actualizamos el costo horario de cada equipo seleccionado.

Proyecto Línea Amarilla Viaducto 6.1 - Sector 01		Proyecto Línea Amarilla Viaducto 6.1 - Sector 01		Proyecto Línea Amarilla Viaducto 6.1 - Sector 01																																	
<b>Detalle del proyecto</b>		<b>Detalle del proyecto</b>		<b>Detalle del proyecto</b>																																	
Espesor (cm)	Factor eficiencia	Espesor (cm)	Factor eficiencia	Espesor (cm)	Factor eficiencia																																
20	0.2	20	0.2	20	0.2																																
Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)																																
200	2770.0	200	2770.0	200	2770.0																																
Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)																																	
13660.0		13660.0		13660.0																																	
Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo																																
6.5	Semicohesivo(95.0%)	6.5	Semicohesivo(95.0%)	6.5	Semicohesivo(95.0%)																																
Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas																																
36.0	2	36.0	2	36.0	2																																
<b>Equipos</b>		<b>Equipos</b>		<b>Equipos</b>																																	
<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;"><b>CS54B</b></td><td style="text-align: center;"><b>CS56B</b></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">95.0%</td><td style="text-align: center;">95.0%</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">9 pasadas</td><td style="text-align: center;">8 pasadas</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\$40.24</td><td style="text-align: center;">\$52.0</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">R1=22.044445</td><td style="text-align: center;">R1=24.800001</td></tr> </table>	<b>CS54B</b>	<b>CS56B</b>	95.0%	95.0%	9 pasadas	8 pasadas	\$40.24	\$52.0	R1=22.044445	R1=24.800001	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;"><b>CS54B</b></td><td style="text-align: center;"><b>CS56B</b></td><td style="text-align: center;"><b>CS64</b></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">95.0%</td><td style="text-align: center;">95.0%</td><td style="text-align: center;">95.0%</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">9 pasadas</td><td style="text-align: center;">8 pasadas</td><td style="text-align: center;">7 pasadas</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\$40.24</td><td style="text-align: center;">\$52.0</td><td style="text-align: center;">\$58.77</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">R1=22.044445</td><td style="text-align: center;">R1=24.800001</td><td style="text-align: center;">R1=28.34286</td></tr> </table>	<b>CS54B</b>	<b>CS56B</b>	<b>CS64</b>	95.0%	95.0%	95.0%	9 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	\$40.24	\$52.0	\$58.77	R1=22.044445	R1=24.800001	R1=28.34286	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;"><b>CS56B</b></td><td style="text-align: center;"><b>CS64B</b></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">95.0%</td><td style="text-align: center;">95.0%</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">8 pasadas</td><td style="text-align: center;">7 pasadas</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">\$52.0</td><td style="text-align: center;">\$58.77</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">R1=24.800001</td><td style="text-align: center;">R1=28.34286</td></tr> </table>	<b>CS56B</b>	<b>CS64B</b>	95.0%	95.0%	8 pasadas	7 pasadas	\$52.0	\$58.77	R1=24.800001	R1=28.34286
<b>CS54B</b>	<b>CS56B</b>																																				
95.0%	95.0%																																				
9 pasadas	8 pasadas																																				
\$40.24	\$52.0																																				
R1=22.044445	R1=24.800001																																				
<b>CS54B</b>	<b>CS56B</b>	<b>CS64</b>																																			
95.0%	95.0%	95.0%																																			
9 pasadas	8 pasadas	7 pasadas																																			
\$40.24	\$52.0	\$58.77																																			
R1=22.044445	R1=24.800001	R1=28.34286																																			
<b>CS56B</b>	<b>CS64B</b>																																				
95.0%	95.0%																																				
8 pasadas	7 pasadas																																				
\$52.0	\$58.77																																				
R1=24.800001	R1=28.34286																																				
<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>																																	

Figura 5.21. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción para el viaducto 6.1 – sector 01.

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 5.21. obtenemos los valores de la velocidad de producción para cada equipo:

– Velocidad de producción de cada equipo ofertado (m<sup>3</sup>/h):

- $r_1$  (CS54 B) = 20.04
- $r_2$  (CS56 B) = 24.80
- $r_3$  (CS64 B) = 28.34

Se observa que los modelos CS54 B, CS56 B y CS64 B producirán 20.04 m<sup>3</sup>, 24.80 m<sup>3</sup> y 28.34 m<sup>3</sup> respectivamente por cada hora de uso efectivo, de acuerdo a las condiciones del proyecto. Es coherente con el hecho de que no podrá vibrar en frecuencia alta debido a la ubicación geográfica del frente de trabajo.

- Sector 02

Seleccionamos los modelos ofertados para determinar la velocidad de producción de acuerdo a las condiciones propias del frente de trabajo.

The screenshot shows a list of equipment models for selection. The models are CS44B, CS54B, CS56B, CS64B, CS66B, and CS68B. Each model is listed with its name, type (Semicohesivo), price, and a percentage (95.0%). The number of passes (pasadas) is also indicated. The models CS54B, CS56B, and CS64B are selected, indicated by a green checkmark in a box. The models CS44B and CS66B are not selected, indicated by an empty box. The model CS68B is partially visible at the bottom. A purple button labeled 'AGREGAR' is at the bottom of the list.

Modelo	Estado	Preço	Pasadas
CS44B	<input type="checkbox"/>	\$36.0	10 pasadas
CS54B	<input checked="" type="checkbox"/>	\$37.0	9 pasadas
CS56B	<input checked="" type="checkbox"/>	\$38.0	8 pasadas
CS64B	<input checked="" type="checkbox"/>	\$39.0	7 pasadas
CS66B	<input type="checkbox"/>	\$40.0	6 pasadas
CS68B	<input type="checkbox"/>		

Figura 5.22. Selección de modelos disponibles para el viaducto 6.1 – sector 02.

Fuente: Elaboración Propia

Ahora, en los equipos seleccionados se actualizan los costos horarios.

Proyecto Línea Amarilla Viaducto 6.1 - Sector 02		Proyecto Línea Amarilla Viaducto 6.1 - Sector 02		Proyecto Línea Amarilla Viaducto 6.1 - Sector 02	
<b>Detalle del proyecto</b>		<b>Detalle del proyecto</b>		<b>Detalle del proyecto</b>	
Esesor (cm)	Factor eficiencia	Esesor (cm)	Factor eficiencia	Esesor (cm)	Factor eficiencia
20	0.5	20	0.5	20	0.5
Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)	Altura (msnm)	Área proyecto (m2)
200	675.0	200	675.0	200	675.0
Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)		Volumen de relleno a compactar(m3)	
6412.0		6412.0		6412.0	
Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo	Horas efectivas	Tipo suelo
6.5	Semicohesivo(95.0%)	6.5	Semicohesivo(95.0%)	6.5	Semicohesivo(95.0%)
Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas	Plazo de ejecución (días)	Jornadas
36.0	2	36.0	2	36.0	2
<b>Equipos</b>		<b>Equipos</b>		<b>Equipos</b>	
<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>		<input type="button" value="AGREGAR EQUIPO"/>	
CS54B	CS56B	S54B	CS56B	CS64B	CS64B
95.0%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%	95.0%
9 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	8 pasadas	7 pasadas	7 pasadas
\$40.24	\$52.0	\$58.77	\$52.0	\$58.77	\$58.77
R1=55.11111	R1=62.0	R1=55.11111	R1=62.0	R1=70.86	R1=70.85714
<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>		<input type="button" value="CALCULAR"/>	

Figura 5.23. Equipos ofertados con sus respectivas velocidades de producción para el viaducto 6.1 – sector 02.

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 5.23. obtenemos los valores de la velocidad de producción para cada equipo:

– Velocidad de producción de cada equipo ofertado (m3/h):

- $r_1$  (CS54 B) = 55.11
- $r_2$  (CS56 B) = 62.00
- $r_3$  (CS64 B) = 70.86

Se observa que los modelos CS54 B, CS56 B y CS64 B producirán 55.11 m3, 62.00 m3 y 70.86 m3 respectivamente por cada hora de uso efectivo, de acuerdo a las condiciones del proyecto. Es coherente con el hecho de que no podrá vibrar en frecuencia alta hasta llegar a la mitad de la altura total del relleno controlado.

### 5.5.2.3. Datos de Salida del Software

- Sector 01

En la figura 5.24. se presenta el dimensionamiento de equipos y la función objetivo optimizada que realiza la aplicación *OptimiAPP*.



Figura 5.24. Datos de salida de la aplicación para el viaducto 6.1 – sector 01.

Fuente: Elaboración Propia

Se muestran los siguientes resultados:

- Función objetivo optimizada (USD/h):

$$Z = 80.48$$

- Cantidad y tipo de equipos de compactación (Unidades):

- $x_1$  (CS54 B) = 2.00
- $x_2$  (CS56 B) = 0.00
- $x_3$  (CS64 B) = 0.00

Se puede observar que para el sector 01, se debe alquilar dos (02) rodillos compactadores del modelo CS54 B con un alquiler de 80.48 USD/h, a fin de cumplir con el objetivo del proyecto en el plazo establecido.

- Sector 02

En la figura 5.25. se presenta el dimensionamiento de equipos y la función objetivo optimizada que realiza la aplicación *OptimiAPP*.

**Resumen de la operación**

Primera restricción	R
55.11111_X1 + 62.0_X2 + 70.85714_X3 >=	13.70085 4
Segunda restricción	A
192.3239_X1 + 192.44525_X2 + 192.44525_X3 <=	675.0
Función objetivo	
40.24_X1 + 52.0_X2 + 58.77_X3	
<p><b>Modelo 1(CS54B):</b> 1.0 unidades</p> <p><b>Modelo 2(CS56B):</b> 0.0 unidades</p> <p><b>Modelo 3(CS64B):</b> 0.0 unidades</p>	
Costo de la flota (USD/h)	
40.24 USD/h	
<div style="background-color: #4a4a9a; color: white; padding: 5px 20px; border-radius: 5px; display: inline-block;">ENTENDIDO</div>	

Figura 5.25. Datos de salida de la aplicación para el viaducto 6.1 – sector 02.

Fuente: Elaboración Propia

Se muestran los siguientes resultados:

- Función objetivo optimizada (USD/h):

$$Z = 40.24$$

- Cantidad y tipo de equipos de compactación (Unidades):

- $x_1$  (CS54 B) = 1.00
- $x_2$  (CS56 B) = 0.00
- $x_3$  (CS64 B) = 0.00

Se puede observar que para el sector 02, se debe alquilar un (01) rodillo compactador del modelo CS54 B con un alquiler de 40.24 USD/h, a fin de cumplir con el objetivo del proyecto en el plazo establecido.

## 5.6. RESUMEN

En este capítulo se ha expuesto el uso de la aplicación desarrollada *OptimiAPP*, cuyo objetivo es optimizar la flota de equipos de compactación. Para el caso de esta investigación, se ha logrado optimizar la obra Línea Amarilla, en específico, los trabajos de compactación masiva de relleno controlado de los viaductos 4.2 y 6.1.

Se comenzó determinando la necesidad de optimizar el proceso constructivo con mayor incidencia en costo y plazo, dando como resultado la partida de relleno controlado, basándonos en el presupuesto de obra y la clasificación Pareto. Luego de ello, se realizó la recopilación de la data inicial necesaria para ejecutar nuestra aplicación, dicha información se extrajo de las especificaciones técnicas, características propias de cada frente de trabajo y de la información de oferta de equipos de compactación por parte de el/los proveedores de equipos del proyecto.

Con todo ello, se realizó la ejecución de la aplicación *OptimiAPP*, de donde se obtuvieron los equipos necesarios para cumplir con la entrega de los frentes de trabajo y el costo horario (USD/h) de cada uno de ellos.

**CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS****6.1. INTRODUCCIÓN**

Luego de la ejecución de la aplicación *OptimiAPP* para los viaductos 4.2 y 6.1, se realizará la interpretación de los datos entregados y el análisis respectivo con el fin de mejorar el proceso de compactación, empleando la Gestión del Valor Ganado EVM.

Para ello establecemos los siguientes conceptos empleados en el análisis de los resultados obtenidos:

Tabla 6.1. Detalle de los conceptos utilizados para el análisis de resultados.

Detalle	Unidad	Descripción
Avance Planeado	m3 compactados	Avance que se estima realizar durante el tiempo de ejecución del proyecto. En nuestro caso, la estimación del avance planeado será fraccionado y detallado de manera semanal.
Avance Ganado	m3 compactados	Avance entregado, mediante protocolos de conformidad, de la actividad en específico (en nuestro caso relleno controlado) al cliente, a la fecha de evaluación o corte.
Avance Ejecutado	m3 compactados	Avance realizado en el frente de trabajo. No necesariamente entregado en su totalidad al cliente a la fecha de corte, esto por una cuestión de tiempo. Dicho avance no debe presentar no conformidades por parte de la supervisión.
Hora Máquina Planeada	Hora - Máquina	Total de horas estimadas en la etapa de planeamiento para la ejecución del trabajo. En nuestro caso, la estimación será fraccionado y detallado de manera semanal.
Hora Máquina Ganada	Hora - Máquina	Total de horas empleadas en la ejecución del trabajo entregado, mediante protocolos de conformidad, al cliente, a la fecha de evaluación o corte.
Hora Máquina Real	Hora - Máquina	Total de horas empleadas en la ejecución de los trabajos que se realizan. No necesariamente entregado en su totalidad al cliente hasta la fecha de evaluación o corte.

Fuente: Elaboración Propia

## 6.2. VIADUCTO 4.2

### 6.2.1. Ejecución en el Frente de Trabajo

Los detalles de la actividad de relleno controlado en el frente son los siguientes:

Metrado de ejecución	:	10'800.00	m3
Cantidad de Equipos	:	01	Und
Modelo del Equipo	:	HAMM 3410	
Costo Horario por Equipo	:	40.24	USD/hm
Plazo planeado	:	36	Días
Jornadas	:	02	Jornadas/día
Horas efectivas	:	05	h
Horas máquina planeadas <sup>47</sup>	:	360	hm
Fecha de Inicio Real	:	04/07/2017	
Fecha de Fin Real	:	10/08/2017	

Se puede notar que el rodillo compactador es de la marca HAMM, modelo 3410. Equipo de 10.53 toneladas, con un tambor liso vibratorio de 2.14 metros de ancho y potencia de 130 HP. Características similares al CS54 B y con el costo horario igual al equipo determinado por la aplicación.

Se presenta a continuación el comportamiento del avance, en semanas, del relleno controlado, dicho seguimiento se realizó desde el inicio de los trabajos, hasta el nivel de sub-base del viaducto 4.2 que es el final del relleno.

Tabla 6.2. Avance semanal del relleno controlado en el viaducto 4.2.

	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Avance Planeado (m3)	1,800.00	1,800.00	1,800.00	1,800.00	1,800.00	1,800.00
Avance Ganado (m3)	500.00	700.00	2,500.00	2,500.00	3,000.00	1,600.00
Avance Ejecutado (m3)	600.00	800.00	2,600.00	2,650.00	1,950.00	1,080.00

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 6.1. se muestra el avance de manera gráfica mediante un diagrama de barras.

<sup>47</sup> Viene a ser el producto del número de equipos (maquina), plazo  $T$  (días), por el número de jornadas  $J$  (jornadas/día) y horas efectivas  $he$  (horas/jornada) de trabajo del equipo de compactación.

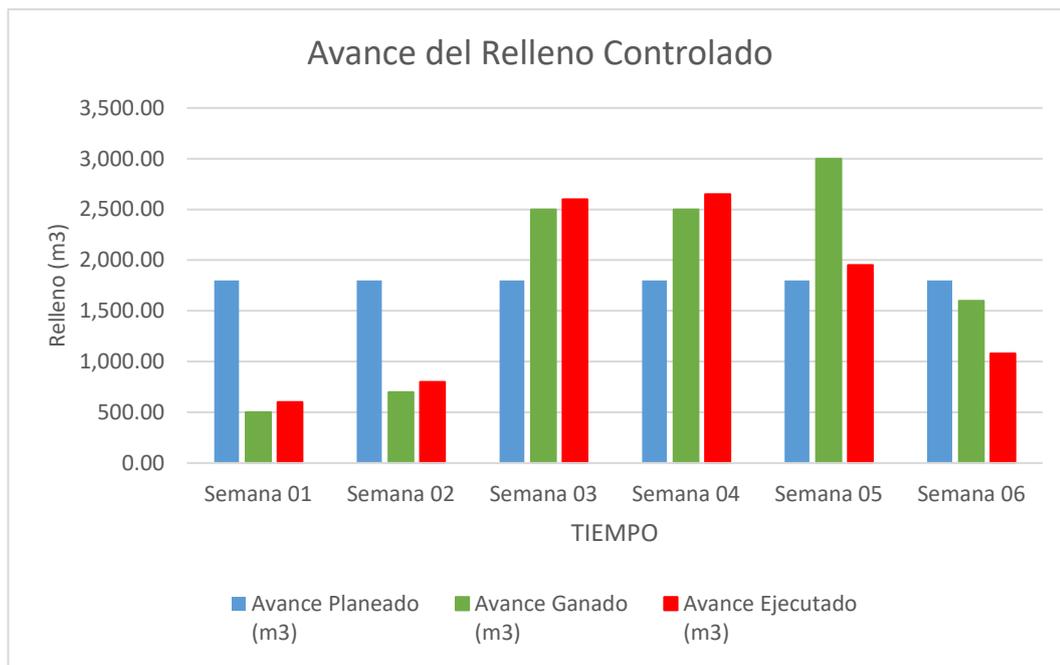


Figura 6.1. Avance semanal del relleno controlado del viaducto 4.2.

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta a continuación el control de las horas-máquina realizado para el rodillo compactador durante todo el proceso de ejecución en base al avance semanal del relleno controlado en el frente.

Tabla 6.3. Desempeño de las horas máquina del equipo en la ejecución del relleno controlado en el viaducto 4.2.

	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Hora Máquina Planeada (hm)	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
Hora Máquina Ganada (hm)	16.67	23.33	83.33	83.33	100.00	53.33
Hora Máquina Real (hm)	62.00	58.00	54.00	58.00	60.00	35.00

Fuente: Elaboración Propia

### 6.2.2. Gestión del Valor Ganado

Para la elaboración del valor ganado en el frente se tomarán en cuenta los costos incurridos tanto en el material como en los equipos de compactación, costos como mano de obra y equipos no son analizados al no ser optimizados en esta tesis.

Recordemos el costo unitario del material y los equipos de compactación:

CU del material<sup>48</sup> : 4.50 USD/m<sup>3</sup>

CU del equipo compactador : 40.24 USD/hm

Con ello se elabora el cuadro del valor ganado de acuerdo al avance acumulado durante el plazo de ejecución. Este cuadro se realiza en base a las relaciones estudiadas en el subcapítulo 2.7.

Tabla 6.4. Cálculo del valor planeado PV, valor ganado EV y costo real AC de la actividad de relleno controlado en el viaducto 4.2.

		Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Material	Valor Planificado PV (USD)	8,100.00	16,200.00	24,300.00	32,400.00	40,500.00	48,600.00
	Valor Ganado EV (USD)	2,250.00	5,400.00	16,650.00	27,900.00	41,400.00	48,600.00
	Costo Real AC (USD)	2,700.00	6,300.00	18,000.00	29,925.00	38,700.00	43,560.00
Equipo	Valor Planificado PV (USD)	2,414.40	4,828.80	7,243.20	9,657.60	12,072.00	14,486.40
	Valor Ganado EV (USD)	670.67	1,609.60	4,962.93	8,316.27	12,340.27	14,486.40
	Costo Real AC (USD)	2,494.88	4,828.80	7,001.76	9,335.68	11,750.08	13,158.48
TOTAL	Valor Planificado PV (USD)	10,514.40	21,028.80	31,543.20	42,057.60	52,572.00	63,086.40
	Valor Ganado EV (USD)	2,920.67	7,009.60	21,612.93	36,216.27	53,740.27	63,086.40
	Costo Real AC (USD)	5,194.88	11,128.80	25,001.76	39,260.68	50,450.08	56,718.48

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el Valor Planificado PV total al final es del USD 63,086.40, el Valor Ganado EV es de USD 63,086.40 y el Costo Real AC de la actividad es de USD 56,718.48.

Esta diferencia en el costo real y el valor ganado se puede notar claramente en la curva “S” del costo a continuación.

<sup>48</sup> Revisar tabla 5.3. donde figura el costo unitario (USD/m<sup>3</sup>) de recursos a utilizar en la ejecución del relleno controlado del viaducto 4.2. Dicho costo considera el esponjamiento del material.

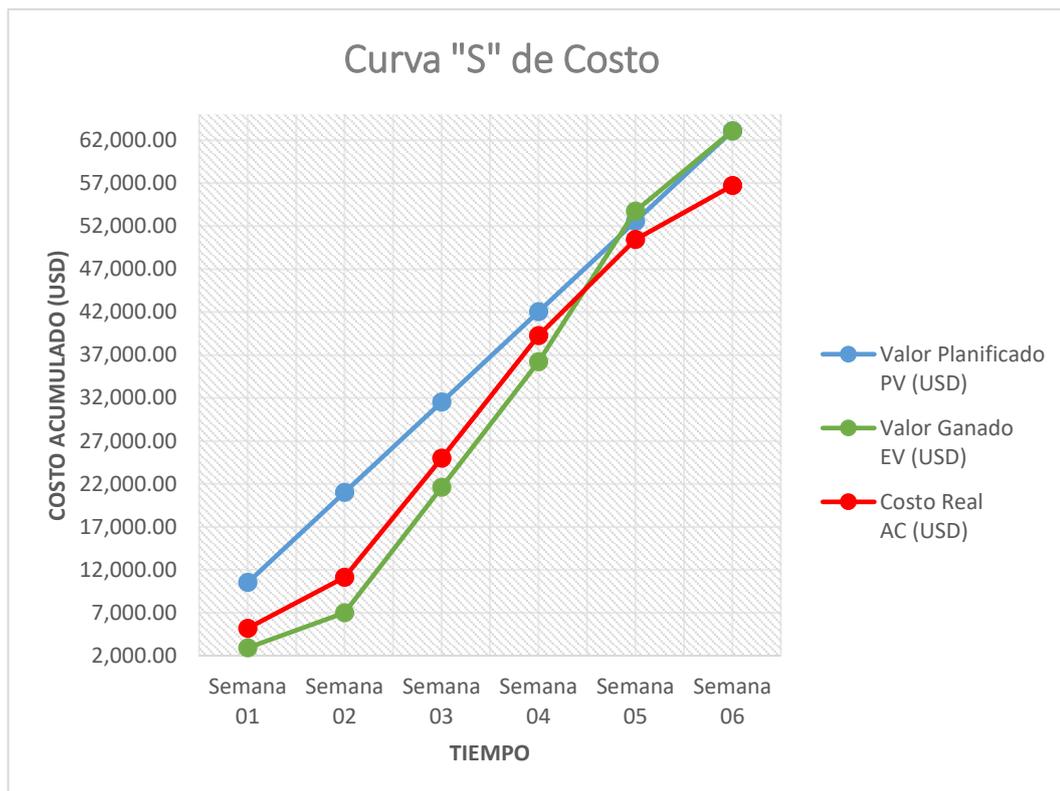


Figura 6.2. Curva "S" del costo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 4.2.

Fuente: Elaboración Propia

### 6.2.3. Proyección de la Obra sin Optimizar

Determinamos el presupuesto de la actividad de compactación sin la optimización realizada BAC (USD), en base al presupuesto.

Recordemos el costo unitario del material y los equipos de compactación del presupuesto para el viaducto 4.2 (ver tabla 5.3.):

CU del material : 4.50 USD/m<sup>3</sup>

CU del equipo compactador : 3.50 USD/m<sup>3</sup>

Tabla 6.5. Costo total de la actividad de compactación sin optimizar para el viaducto 4.2.

	Costo Unitario Presupuesto (USD/m <sup>3</sup> )	Metrado a Ejecutar (m <sup>3</sup> )	Costo Parcial (USD)
Material Granular	4.50	10,800.00	48,600.00
Equipos de Compactación	3.50	10,800.00	37,800.00
Presupuesto Sin Optimizar BAC			86,400.00

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, el presupuesto total de la actividad sin optimizar BAC, considerando el material granular y los equipos de compactación asciende a USD 86,400.00.

#### 6.2.4. Determinación de Ahorros

##### 6.2.4.1. A Nivel de Plazo

Determinamos los indicadores de cronograma en el desarrollo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 4.2.

Índice de Desempeño del Cronograma (SPI):

$$\text{SPI} = \text{EV} / \text{PV} = 63,086.40 / 63,086.40 = 1.00$$

Variación del Cronograma (SV):

$$\text{SV} = \text{EV} - \text{PV} = 63,086.40 - 63,086.40 = 0.00$$

En base al Índice de Desempeño del Cronograma (SPI), el proyecto realizó un eficiente uso del tiempo (SPI = 1.00).

Notar que en un primero momento se registró un avance acumulado debajo del planificado en las primeras 02 semanas, debido a la condición inicial del área a compactar, pero luego de equilibrar el nivel de compactado se registró un avance por encima del plan y recuperándose a la mitad de la semana 06.

De la misma forma se nota, en base a la Variación del Cronograma (SV), que la actividad culminó dentro del plazo establecido de ejecución (SV = 0.00).

Veamos las fechas de término del frente de trabajo:

Fecha Fin Planeada <sup>49</sup>	:	14/08/2017
Fecha Fin Real	:	10/08/2017
Plazo Ganado/Perdido	:	+04 días

Como se observa, el frente se culminó 04 días antes de lo planeado. Resultado positivo a fin de dar comienzo a las actividades siguientes según el cronograma del proyecto.

---

<sup>49</sup> De acuerdo a la fecha presentada en el capítulo V.

#### 6.2.4.2. A Nivel de Costo

Determinamos los indicadores de costo en el desarrollo de la actividad de relleno controlado.

Índice de Desempeño del Costo (CPI):

$$\text{CPI} = \text{EV} / \text{AC} = 63,086.40 / 56,718.48 = 1.11$$

Variación del Costo (CV):

$$\text{CV} = \text{EV} - \text{AC} = 63,086.40 - 56,718.48 = 6,367.92 \text{ (USD)}$$

En base al Índice de Desempeño del Costo (CPI), el proyecto realizó un eficiente uso del costo planificado ( $\text{CPI} > 1.00$ ). Esto debido a las 327.00 hm usadas sobre las 360.00 hm planeadas. El material sostuvo su costo planificado hasta final.

De la misma forma se nota, en base a la Variación del Costo (CV), la actividad tuvo un costo por debajo de lo planificado, ahorrando USD 6,367.92 en toda la actividad de relleno controlado. Esto debido al menor uso de hm para culminar el trabajo.

Determinemos ahora la variación del costo del proyecto sin optimizar para el relleno controlado.

Estimado a la Conclusión EAC (USD):

$$\text{EAC} = \text{AC} , \text{ debido a que ya finalizó la actividad de relleno controlado.}$$

Variación a la Conclusión (VAC):

$$\text{VAC} = \text{BAC} - \text{EAC} = 86,400.00 - 56,718.48 = 29,681.52 \text{ (USD)}$$

Según lo obtenido, la variación a la conclusión del proyecto sin optimizar (BAC) sería de USD 29,681.52 para la actividad de relleno controlado.

Se muestran a continuación las imágenes del trabajo de relleno controlado desarrollado en el viaducto 4.2.

Se comienza con el estado inicial del frente, en el que aparece lo avanzado hasta antes de la optimización realizada.



Figura 6.3. Vista aérea del viaducto 4.2 antes de iniciar con la optimización en el frente.  
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 6.4. se observa el trabajo del rodillo HAMM 3410 de características similares al CS54 B determinado por la aplicación.

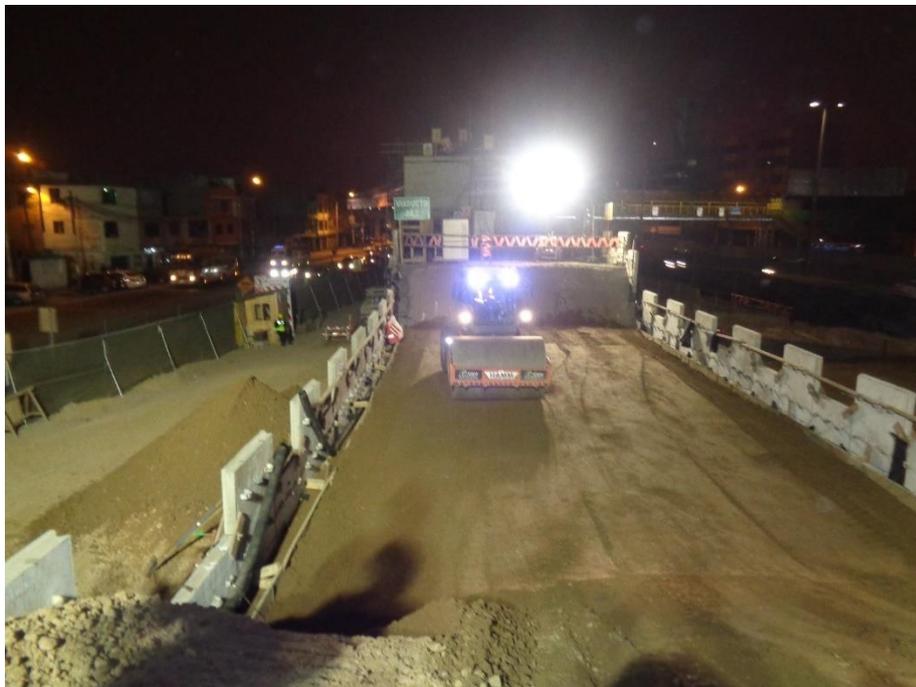


Figura 6.4. Proceso de compactación inicial del material granular en el viaducto 4.2 con el rodillo HAMM 3410.  
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 6.5. se observa cómo el rodillo ya superó el nivel de compactación que ya había sido ejecutado antes de la optimización y a partir de allí el avance se incrementó.

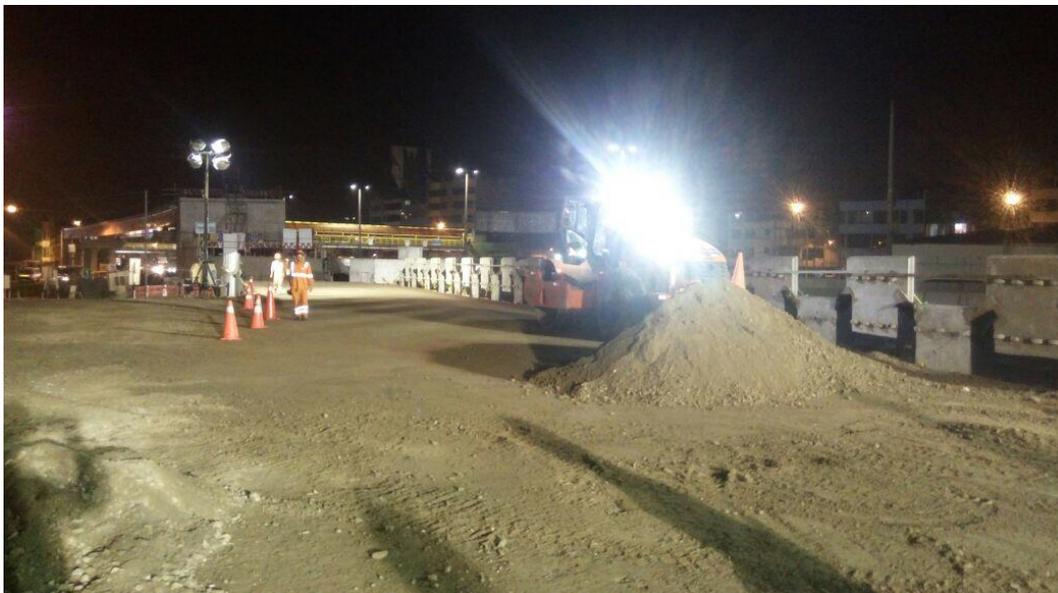


Figura 6.5. Proceso de compactación realizado con el rodillo HAMM 3410 luego de alcanzar el nivel de compactación de lo ejecutado antes de la optimización.

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 6.6. se muestra el muro de tierra armada del viaducto 4.2 compactado en su totalidad incluido los trabajos de base granular y pavimentación.



Figura 6.6. Entrega final del muro de tierra armada de viaducto 4.2.

Fuente: GyM (2018)

## 6.3. VIADUCTO 6.1

## 6.3.1. Ejecución en el Frente de Trabajo

- Sector 01

Los detalles de la actividad de relleno controlado en el frente son los siguientes:

Metrado de ejecución	:	13,660.00	m3
Cantidad de Equipos	:	02	Und
Modelo del Equipo 01	:	HAMM 3410	
Modelo del Equipo 02	:	BOMAG BW 211 D-5	
Costo Horario por Equipo	:	40.24	USD/hm
Plazo planeado	:	36	Días
Jornadas	:	02	Jornadas/día
Horas efectivas	:	6.50	h
Horas máquina planeadas	:	936	hm
Fecha de Inicio Real	:	14/08/2017	
Fecha de Fin Real	:	20/09/2017	

Se puede notar que los equipos son de la marca HAMM, modelo 3410, equipo de 10.53 toneladas, con un tambor liso vibratorio de 2.14 metros de ancho y potencia de 130 HP. También de la marca BOMAG, modelo BW 211 D-5, equipo de 10.60 toneladas, con un tambor liso vibratorio de 2.13 metros de ancho y potencia de 131 HP. Características similares al CS54 B y con el costo horario igual al equipo determinado por la aplicación.

Se presenta a continuación el comportamiento del avance, en semanas, del relleno controlado, dicho seguimiento se realizó desde el inicio de los trabajos, hasta el nivel de sub-base que es el final del relleno del viaducto 6.1, sector 01.

Tabla 6.6. Avance semanal del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.

	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Avance Planeado (m3)	2,276.67	2,276.67	2,276.67	2,276.67	2,276.67	2,276.67
Avance Ganado (m3)	2,200.00	2,400.00	2,450.00	2,450.00	2,450.00	1,710.00
Avance Ejecutado (m3)	2,350.00	2,300.00	2,400.00	2,600.00	2,600.00	1,410.00

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 6.7. se muestra el avance de manera gráfica mediante un diagrama de barras.

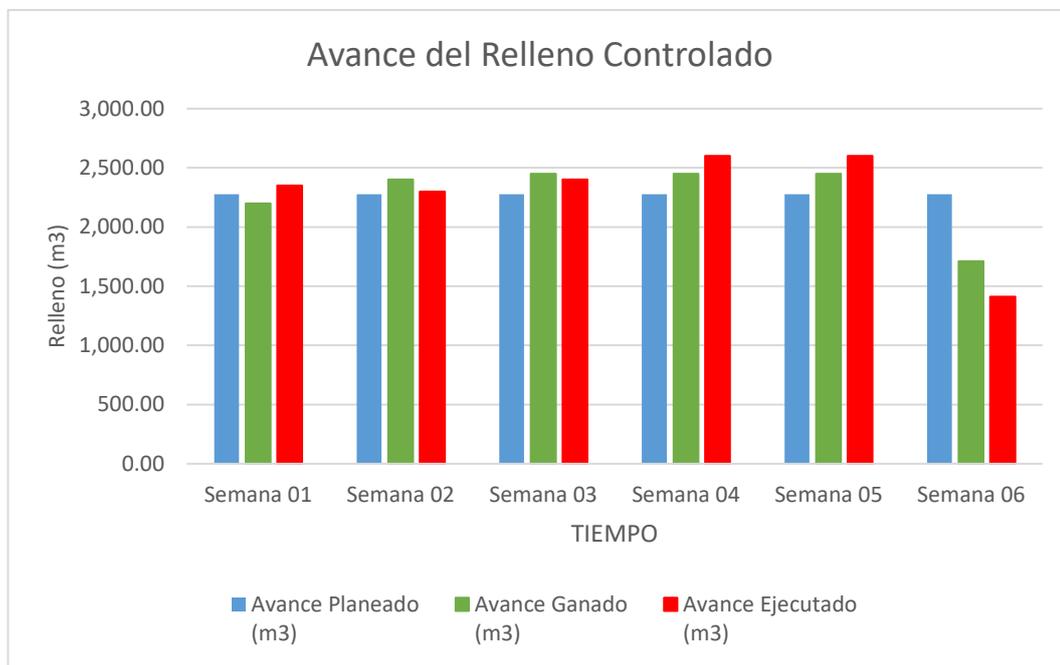


Figura 6.7. Avance semanal del relleno controlado del viaducto 6.1, sector 01.

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta a continuación el control de las horas-máquina realizado para el rodillo compactador durante todo el proceso de ejecución en base al avance semanal del relleno controlado en el frente.

Tabla 6.7. Desempeño de las horas máquina del equipo en la ejecución del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.

	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Hora Máquina Planeada (hm)	156.00	156.00	156.00	156.00	156.00	156.00
Hora Máquina Ganada (hm)	150.75	164.45	167.88	167.88	167.88	117.17
Hora Máquina Real (hm)	160.00	156.00	148.00	148.00	150.00	80.00

Fuente: Elaboración Propia

- Sector 02

Los detalles de la actividad de relleno controlado en el frente son los siguientes:

Metrado de ejecución	:	6,412.00	m <sup>3</sup>
Cantidad de Equipos	:	01	Und
Modelo del Equipo	:	BOMAG BW 211 D-5	
Costo Horario por Equipo	:	40.24	USD/hm
Plazo planeado	:	36	Días
Jornadas	:	02	Jornadas/día
Horas efectivas	:	6.50	h
Horas máquina planeadas	:	468	hm
Fecha de Inicio Real	:	14/08/2017	
Fecha de Fin Real	:	23/09/2017	

Se puede notar que el equipo es de la marca BOMAG, modelo BW 211 D-5, equipo de 10.60 toneladas, con un tambor liso vibratorio de 2.13 metros de ancho y potencia de 131 HP. Características similares al CS54 B y con el costo horario igual al equipo determinado por la aplicación.

Se presenta a continuación el comportamiento del avance, en semanas, del relleno controlado, dicho seguimiento se realizó desde el inicio de los trabajos, hasta el nivel de sub-base que es el final del relleno del viaducto 6.1, sector 02.

Tabla 6.8. Avance semanal del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.

	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Avance Planeado (m <sup>3</sup> )	1,068.67	1,068.67	1,068.67	1,068.67	1,068.67	1,068.67
Avance Ganado (m <sup>3</sup> )	550.00	700.00	780.00	1,500.00	1,500.00	1,382.00
Avance Ejecutado (m <sup>3</sup> )	550.00	650.00	800.00	1,300.00	1,700.00	1,412.00

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 6.8 se muestra el avance de manera gráfica mediante un diagrama de barras.

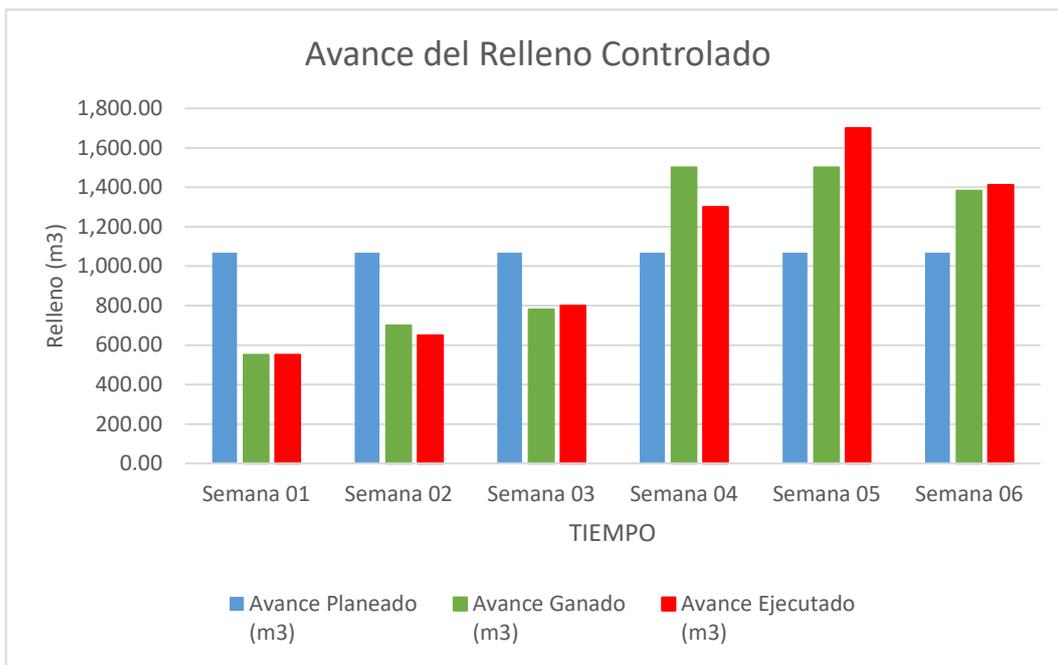


Figura 6.8. Avance semanal del relleno controlado del viaducto 6.1, sector 02.

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta a continuación el control de las horas-máquina realizado para el rodillo compactador durante todo el proceso de ejecución en base al avance semanal del relleno controlado en el frente.

Tabla 6.9. Desempeño de las horas máquina del equipo en la ejecución del relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.

	Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Hora Máquina Planeada (hm)	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00	78.00
Hora Máquina Ganada (hm)	40.14	51.09	56.93	109.48	109.48	100.87
Hora Máquina Real (hm)	60.00	62.00	62.00	64.00	65.00	50.00

Fuente: Elaboración Propia

### 6.3.2. Gestión del Valor Ganado

Como se ha indicado, para la elaboración del valor ganado en los sectores 01 y 02 del viaducto 6.1 solo se tomarán en cuenta los costos incurridos en el material y en los equipos de compactación, por ser estos últimos materia de optimización.

- Sector 01

El Costo unitario del material y los equipos de compactación:

CU del material<sup>50</sup> : 4.50 USD/m<sup>3</sup>

CU del equipo compactador : 40.24 USD/hm

Con ello elabora el cuadro del valor ganado de acuerdo al avance acumulado durante el plazo de ejecución.

Tabla 6.10. Cálculo del valor planeado PV, valor ganado EV y costo real AC de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.

		Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Material	Valor Planificado PV (USD)	10,245.00	20,490.00	30,735.00	40,980.00	51,225.00	61,470.00
	Valor Ganado EV (USD)	9,900.00	20,700.00	31,725.00	42,750.00	53,775.00	61,470.00
	Costo Real AC (USD)	10,575.00	20,925.00	31,725.00	43,425.00	55,125.00	61,470.00
Equipo	Valor Planificado PV (USD)	6,277.44	12,554.88	18,832.32	25,109.76	31,387.20	37,664.64
	Valor Ganado EV (USD)	6,066.05	12,683.55	19,438.92	26,194.30	32,949.67	37,664.64
	Costo Real AC (USD)	6,438.40	12,715.84	18,671.36	24,626.88	30,662.88	33,882.08
TOTAL	Valor Planificado PV (USD)	16,522.44	33,044.88	49,567.32	66,089.76	82,612.20	99,134.64
	Valor Ganado EV (USD)	15,966.05	33,383.55	51,163.92	68,944.30	86,724.67	99,134.64
	Costo Real AC (USD)	17,013.40	33,640.84	50,396.36	68,051.88	85,787.88	95,352.08

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el Valor Planificado PV total al final es de USD 99,134.64, el Valor Ganado EV es de USD 99,134.64 y el Costo Real AC de la actividad es de USD 95,352.08.

La diferencia entre el Costo Real AC y el Valor Ganado VG se puede notar en la curva "S" del costo de la figura 6.9.

<sup>50</sup> Revisar tabla 5.5. donde figura el costo unitario (USD/m<sup>3</sup>) de recursos a utilizar en la ejecución del relleno controlado del viaducto 6.1. Dicho costo considera el esponjamiento del material.

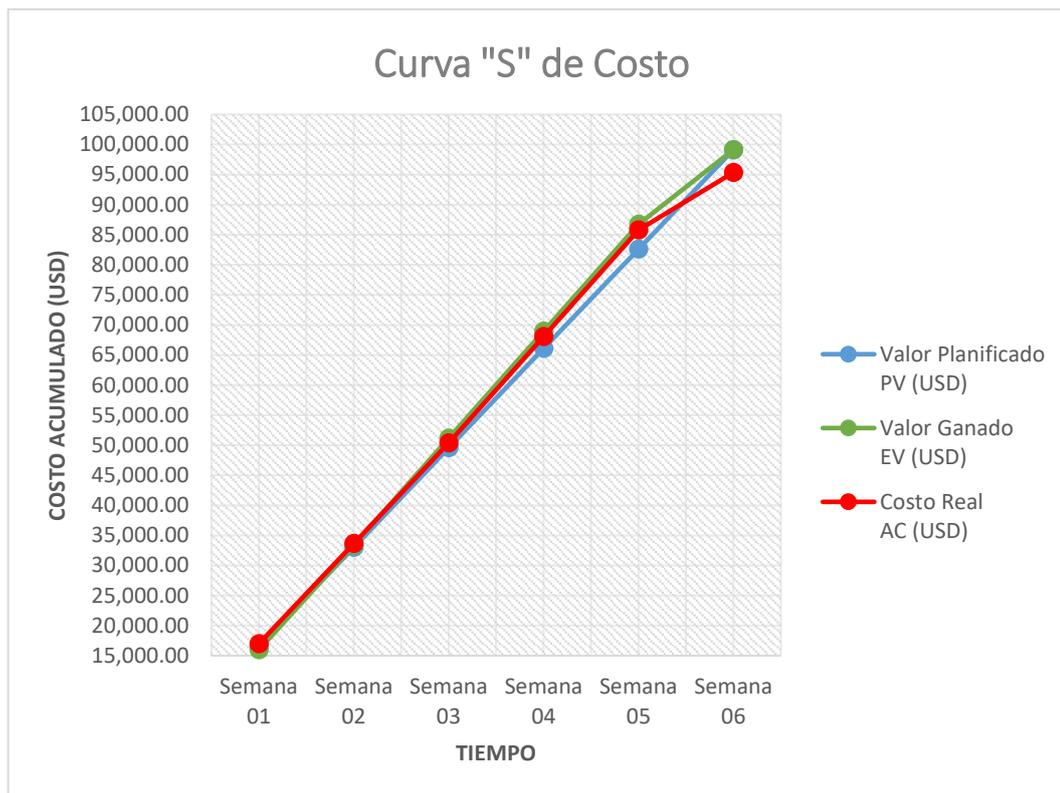


Figura 6.9. Curva "S" del costo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.

Fuente: Elaboración Propia

- Sector 02

El Costo unitario del material y los equipos de compactación:

CU del material<sup>51</sup> : 4.50 USD/m<sup>3</sup>

CU del equipo compactador : 40.24 USD/hm

Con ello elabora el cuadro del valor ganado de acuerdo al avance acumulado durante el plazo de ejecución.

<sup>51</sup> Revisar tabla 5.5. donde figura el costo unitario (USD/m<sup>3</sup>) de recursos a utilizar en la ejecución del relleno controlado del viaducto 6.1. Dicho costo considera el esponjamiento del material.

Tabla 6.11. Cálculo del valor planeado PV, valor ganado EV y costo real AC de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.

		Semana 01	Semana 02	Semana 03	Semana 04	Semana 05	Semana 06
Material	Valor Planificado PV (USD)	4,809.00	9,618.00	14,427.00	19,236.00	24,045.00	28,854.00
	Valor Ganado EV (USD)	2,475.00	5,625.00	9,135.00	15,885.00	22,635.00	28,854.00
	Costo Real AC (USD)	2,475.00	5,400.00	9,000.00	14,850.00	22,500.00	28,854.00
Equipo	Valor Planificado PV (USD)	3,138.72	6,277.44	9,416.16	12,554.88	15,693.60	18,832.32
	Valor Ganado EV (USD)	1,615.37	3,671.30	5,962.20	10,367.76	14,773.33	18,832.32
	Costo Real AC (USD)	2,414.40	4,909.28	7,404.16	9,979.52	12,595.12	14,607.12
TOTAL	Valor Planificado PV (USD)	7,947.72	15,895.44	23,843.16	31,790.88	39,738.60	47,686.32
	Valor Ganado EV (USD)	4,090.37	9,296.30	15,097.20	26,252.76	37,408.33	47,686.32
	Costo Real AC (USD)	4,889.40	10,309.28	16,404.16	24,829.52	35,095.12	43,461.12

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el Valor Planificado PV total al final es de USD 47,686.32, el Valor Ganado EV es de USD 47,686.32 y el Costo Real AC de la actividad es de USD 43,461.12.

La diferencia entre el Costo Real AC y el Valor Ganado VG se puede notar en la curva "S" del costo de la figura 6.10.



Figura 6.10. Curva "S" del costo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.

Fuente: Elaboración Propia

### 6.3.3. Proyección de la Obra sin Optimizar

Determinamos el presupuesto de la actividad de compactación sin la optimización realizada BAC (USD), en base al presupuesto.

- Sector 01

Recordemos el costo unitario del material y los equipos de compactación del presupuesto para el viaducto 6.1, sector 01 (ver tabla 5.5.):

CU del material : 4.50 USD/m<sup>3</sup>

CU del equipo compactador : 3.50 USD/m<sup>3</sup>

Tabla 6.12. Costo total de la actividad de compactación sin optimizar para el viaducto 6.1, sector 01.

	Costo Unitario Presupuesto (USD/m3)	Metrado a Ejecutar (m3)	Costo Total (USD)
Material Granular	4.50	13,660.00	61,470.00
Equipos de Compactación	3.50	13,660.00	47,810.00
Presupuesto Sin Optimizar BAC			109,280.00

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, el presupuesto total de la actividad sin optimizar BAC, considerando el material granular y los equipos de compactación asciende a USD 109,280.00.

- Sector 02

Recordemos el costo unitario del material y los equipos de compactación del presupuesto para el viaducto 6.1, sector 02 (ver tabla 5.5.):

CU del material : 4.50 USD/m3

CU del equipo compactador : 3.50 USD/m3

Tabla 6.13. Costo total de la actividad de compactación sin optimizar para el viaducto 6.1, sector 02.

	Costo Unitario Presupuesto (USD/m3)	Metrado a Ejecutar (m3)	Costo Total (USD)
Material Granular	4.50	6,412.00	28,854.00
Equipos de Compactación	3.50	6,412.00	22,442.00
Presupuesto Sin Optimizar BAC			51,296.00

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, el presupuesto total de la actividad sin optimizar BAC, considerando el material granular y los equipos de compactación asciende a USD 51,296.00.

#### 6.3.4. Determinación de Ahorros

##### 6.3.4.1. A nivel de Plazo

- Sector 01

Determinamos los indicadores de cronograma en el desarrollo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.

Índice de Desempeño del Cronograma (SPI):

$$\text{SPI} = \text{EV} / \text{PV} = 99,134.64 / 99,134.64 = 1.00$$

Variación del Cronograma (SV):

$$\text{SV} = \text{EV} - \text{PV} = 99,134.64 - 99,134.64 = 0.00$$

En base al Índice de Desempeño del Cronograma (SPI), el proyecto realizó un eficiente uso del tiempo (SPI = 1.00).

En este frente se tuvo un avance uniforme debido al área disponible para compactar, la facilidad del acceso para el ingreso de volquetes con material granular y los rodillos determinados por la aplicación trabajando de manera conjunta.

De la misma forma se nota, en base a la Variación del Cronograma (SV), que la actividad culminó dentro del plazo establecido de ejecución (SV = 0.00).

Veamos las fechas de término del frente de trabajo:

Fecha Fin Planeada<sup>52</sup> : 23/09/2017

Fecha Fin Real : 20/09/2017

Plazo Ganado/Perdido : +03 días

Como se observa, el frente se culminó 03 días antes de lo planeado. Resultado positivo a fin de dar comienzo a las actividades siguientes según el cronograma del proyecto.

- Sector 02

Determinamos los indicadores de cronograma en el desarrollo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.

Índice de Desempeño del Cronograma (SPI):

$$\text{SPI} = \text{EV} / \text{PV} = 47,686.32 / 47,686.32 = 1.00$$

Variación del Cronograma (SV):

$$\text{SV} = \text{EV} - \text{PV} = 47,686.32 - 47,686.32 = 0.00$$

En base al Índice de Desempeño del Cronograma (SPI), el proyecto realizó un eficiente uso del tiempo (SPI = 1.00).

---

<sup>52</sup> De acuerdo a la fecha presentada en el capítulo V.

Como se puede notar, las primeras 03 semanas el frente tuvo un avance equivalente a la mitad de lo planeado, esto debido a la restricción de vibrar si no hasta llegar a una altura suficiente la cual la frecuencia alta de vibración no afecte a las casas contiguas. Esto se dio a partir de la cuarta semana, es por ello la recuperación en la producción y terminar el frente en el último día planeado.

De la misma forma se nota, en base a la Variación del Cronograma (SV), que la actividad culminó en el plazo establecido de ejecución (SV = 0.00).

Veamos las fechas de término del frente de trabajo:

Fecha Fin Planeada <sup>53</sup>	:	23/09/2017
Fecha Fin Real	:	23/09/2017
Plazo Ganado/Perdido	:	+00 días

Como se observa, el frente en el plazo planeado. Resultado exacto a fin de dar comienzo a las actividades siguientes según el cronograma del proyecto.

#### 6.3.4.2. A Nivel de Costo

- Sector 01

Determinamos los indicadores de costo en el desarrollo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 01.

Índice de Desempeño del Costo (CPI):

$$\text{CPI} = \text{EV} / \text{AC} = 99,134.64 / 95,352.08 = 1.04$$

Variación del Costo (CV):

$$\text{CV} = \text{EV} - \text{AC} = 99,134.64 - 95,352.08 = 3,782.56 \text{ (USD)}$$

En base al Índice de Desempeño del Costo (CPI), el proyecto realizó un eficiente uso del costo planificado (CPI > 1.00). Esto debido a las 842.00 hm usadas sobre las 936.00 hm planeadas. El material sostuvo su costo planificado hasta final.

De la misma forma se nota, en base a la Variación del Costo (CV), la actividad tuvo un costo por debajo de lo planificado, ahorrando USD 3,782.56 en toda la actividad de relleno controlado. Esto debido al menor uso de hm para culminar el trabajo.

---

<sup>53</sup> De acuerdo a la fecha presentada en el capítulo V.

Determinemos ahora la variación del costo del proyecto sin optimizar para el relleno controlado.

Estimado a la Conclusión EAC (USD):

EAC = AC , debido a que ya finalizó la actividad de relleno controlado.

Variación a la Conclusión (VAC):

VAC = BAC - EAC = 109,280.00 - 95,352.08 = 13,927.92 (USD)

Según lo obtenido, la variación a la conclusión del proyecto sin optimizar (BAC) sería de USD 13,927.92 para la actividad de relleno controlado.

- Sector 02

Determinamos los indicadores de costo en el desarrollo de la actividad de relleno controlado en el viaducto 6.1, sector 02.

Índice de Desempeño del Costo (CPI):

CPI = EV / AC = 47,686.32 / 43,461.12 = 1.10

Variación del Costo (CV):

CV = EV - AC = 47,686.32 - 43,461.12 = 4,225.20 (USD)

En base al Índice de Desempeño del Costo (CPI), el proyecto realizó un eficiente uso del costo planificado (CPI > 1.00). Esto debido a las 363.00 hm usadas sobre las 468.00 hm planeadas. El material sostuvo su costo planificado hasta final.

De la misma forma se nota, en base a la Variación del Costo (CV), la actividad tuvo un costo por debajo de lo planificado, ahorrando USD 4,225.20 en toda la actividad de relleno controlado. Esto debido al menor uso de hm para culminar el trabajo.

Determinemos ahora la variación del costo del proyecto sin optimizar para el relleno controlado.

Estimado a la Conclusión EAC (USD):

EAC = AC , debido a que ya finalizó la actividad de relleno controlado.

Variación a la Conclusión (VAC):

VAC = BAC - EAC = 51,296.00 - 43,461.12 = 7,834.88 (USD)

Según lo obtenido, la variación a la conclusión del proyecto sin optimizar (BAC) sería de USD 7,834.88 para la actividad de relleno controlado.

Se muestra el frente antes de iniciar los trabajos de compactación del muro de tierra armada del viaducto 6.1. Se observan interferencias y desmante.



Figura 6.11. Lugar de ejecución donde se extenderá todo muro de tierra armada del viaducto 6.1 al margen izquierdo del río Rímac.

Fuente: Elaboración Propia

Luego continúan los trabajos de habilitación de área para inicio de construcción del muro de tierra armada (sectores 01 y 02) del viaducto 6.1.



Figura 6.12. Zona liberada para dar inicio a los trabajos de relleno controlado en el viaducto 6.1, sectores 01 y 02.

Fuente: Elaboración Propia

Se muestran los trabajos de compactación con los modelos HAMM y BOMAG para el sector 01 del viaducto 6.1.



Figura 6.13. Rodillos compactadores HAMM 3410 y BOMAG BW 211 compactando frente a frente en el sector 01 del muro de tierra armada del viaducto 6.1.

Fuente: Elaboración Propia



Figura 6.14. Rodillos compactadores HAMM 3410 y BOMAG BW 211 compactando de manera paralela en el sector 01 del muro de tierra armada del viaducto 6.1.

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, se muestran los trabajos de compactación del equipo BOMAG en el sector 02 del viaducto 6.1.



Figura 6.15. Rodillo BOMAG BW 211 compactando en el sector 02 del muro de tierra armada del viaducto 6.1.

Fuente: Elaboración Propia



Figura 6.16. Rodillo BOMAG BW 211 compactando en el sector 02 del muro de tierra armada del viaducto 6.1.

Fuente: Elaboración Propia

En las figura 6.17. y 6.18. se muestra todo el muro de tierra armada del viaducto 6.1. luego de culminado el trabajo de compactación y pavimentación, se puede distinguir muy bien los sectores 01 y 02 divididos por un puente peatonal que cruza el muro compactado.



Figura 6.17. Entrega final del muro de tierra armada del viaducto 6.1.

Fuente: GyM (2018)



Figura 6.18. Entrega final del muro de tierra armada del viaducto 6.1.

Fuente: GyM (2018)

#### 6.4. RESUMEN

En este capítulo se han desarrollado de manera analítica y usando la gestión del valor ganado EVM, los resultados de la optimización de los equipos de compactación a emplear en los trabajos de construcción del muro de tierra armada de los viaductos 4.2 y 6.1.

Se determinaron los ahorros en costo y plazo de dos escenarios: primero, el ahorro correspondiente al planeamiento luego de subcontratar los modelos basados en el uso de la aplicación *OptimiAPP* y; el segundo, el ahorro luego de realizar el ejercicio de la ejecución del proyecto sin optimizar. Esto para ambos viaductos.

Para ambos escenarios se obtuvieron los siguientes resultados:

En el viaducto 4.2 se obtuvo un ahorro en tiempo de 04 días y un ahorro en costo con respecto al planeamiento inicial de USD 6,367.92 y un ahorro en costo de USD 29,681.52 con respecto al proyecto sin optimizar.

En el viaducto 6.1 se concluyó en el plazo establecido y se obtuvo un ahorro en costo con respecto al planeamiento inicial de USD 8,007.76 y un ahorro en costo de USD 21,762.80 con respecto al proyecto sin optimizar de acuerdo al detalle siguiente.

En el sector 01, se obtuvo un ahorro en tiempo de 03 días y un ahorro en costo con respecto al planeamiento inicial de USD 3,782.56 y un ahorro en costo de USD 13,927.92 con respecto al proyecto sin optimizar; en tanto que en el sector 02, se concluyó en el plazo establecido y un ahorro en costo con respecto al planeamiento inicial de USD 4,225.20 y un ahorro en costo de USD 7,834.88 con respecto al proyecto sin optimizar.

Por lo revisado en este capítulo, el implementar el uso de la aplicación *OptimiAPP* en la etapa de planeamiento del proyecto para obras de compactación controlada de suelos generaría el dimensionamiento óptimo de maquinarias de compactación y en consecuencia, un ahorro para la empresa encargada de la construcción.

## CONCLUSIONES

1. Se ha logrado programar un software disponible para dispositivos móviles, empleando el lenguaje Java para sistemas operativos Android, al que se le ha denominado *OptimiAPP*, basado en un modelo matemático que permite optimizar el dimensionamiento de flotas de maquinaria de compactación para obras de movimiento de tierras.
2. El enfoque para abarcar un problema de optimización de equipos inicia con estudiar la forma en la que se realiza la actividad y cómo trabaja la maquinaria empleada, tener conocimiento de ello hará que podamos mejorar la productividad de los equipos a través de la elaboración de un método o una herramienta.
3. Las variables que intervienen en el modelo planteado son determinadas por las condiciones del proyecto a ejecutar, sumado a las condiciones propias de la zona a construir y a las características de los equipos ofertados o disponibles. De la misma forma, el costo de la compactación depende de variables como costo de posesión, costo de operación, costo de adquisición, mantenimiento, valor de salvataje y la mano de obra del operador; todos ellos condensados en el costo unitario de cada equipo de compactación.
4. Los resultados del software son proporcionados por el programa en línea *PHPSimplex*, quien es el que realiza la solución del problema de programación lineal y los devuelve al software desarrollado *OptimiAPP*. Los resultados fueron comprobados empleando el complemento SOLVER del programa Microsoft Excel, arrojando valores con un nivel de aproximación acorde con el esperado para dimensionar equipos (valores enteros exactos), iguales a los datos de salida de nuestro software.
5. La implementación de los resultados proporcionados por la aplicación móvil *OptimiAPP* en el proyecto Línea Amarilla, para el viaducto 4.2, generó un ahorro en tiempo de 04 días, sumado a un ahorro en costo efectivo de USD 6,367.92 y en costo total de USD 29,681.52; mientras que para el viaducto 6.1, resultó que se acabara en el plazo establecido y

generó un ahorro en costo efectivo de USD 8,007.76 y en costo total de USD 21,762.80.

6. El software desarrollado permite incorporar nueva tecnología de compactadores debido a que se puede insertar cualquier maquinaria de compactación, conociendo sus especificaciones técnicas y número de pasadas a fin de lograr el porcentaje de compactación deseado en el material; esto hace que *OptimiAPP* no se limite a la biblioteca de equipos que posee sino que está programado para modelar matemáticamente nuevos equipos compactadores, determinando siempre la flota adecuada para cada proyecto en específico.
7. Se ha optado por la optimización de este tipo de maquinaria debido a que los trabajos de compactación, para un determinado volumen de material, son los de mayor duración en el tiempo; a diferencia de los trabajos de excavación y transporte, por lo que además de lo económico, impactará de manera positiva en el costo de la actividad y en el plazo de ejecución.
8. El proceso de compactación es uno de los más predictivos dentro de un rubro con altos porcentajes de variabilidad, por lo que trasladar la planificación de estos trabajos a una herramienta analítica influirá en la construcción del proyecto e incrementará su factibilidad, confiabilidad y constructividad.
9. El uso de esta herramienta, en la que el usuario puede correr la optimización descargando la aplicación a su teléfono móvil, facilitará el empleo de este software *OptimiAPP* en los proyectos de construcción.
10. Por la forma analítica de su formulación, la herramienta de optimización de la flota de equipos de compactación marca un precedente en este tipo de investigaciones; mejorando el estado del arte con el que actualmente trabajan los proyectos en donde las partidas de movimiento de tierras llegan a ser las más incidentes en costo y plazo.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el uso del software *OptimiAPP* en la etapa de planeamiento del proyecto, pues es en donde la toma de adecuadas decisiones se verá reflejada en ahorro en la etapa de ejecución o construcción.
2. Se recomienda elaborar un plan de mantenimiento y reparación de equipos acorde a la realidad del proyecto, pues afecta de manera directa a la producción. Se deben de evitar las paras de los equipos ocasionadas por fallas mecánicas, que deberían ser atendidas y evitadas cuando se realice el mantenimiento periódico de los equipos con los que cuenta el frente de trabajo.
3. Para los proyectos cuyas partidas de movimiento de tierras tienen una alta incidencia en costo y plazo, se recomienda buscar formas para poder optimizar los procesos, transformar la manera de construir y mejorarla; cumpliendo siempre los estándares de calidad y seguridad del proyecto y país donde se desenvuelvan.
4. Se sugiere realizar una investigación acerca del impacto que produciría contar dentro del equipo de proyecto, con un área dedicada específicamente al estudio de productividad de equipos y comparar el costo/beneficio que tendría al final del proyecto.
5. En base a la investigación realizada, se recomienda la elaboración de nuevas herramientas de optimización, avocadas tanto a los trabajos de compactación, así como también a los trabajos de excavación -en el cálculo de la cantidad de excavadoras para un frente o trabajo en específico- y transporte de material -para el cálculo de cargadores frontales y cantidad de volquetes para demandas de material en una obra-, en donde se deberá tomar en cuenta los equipos adecuados para cada actividad con el fin de obtener a los de mayor eficiencia, enmarcados en un presupuesto en específico.
6. Al comprobar que el programa diseñado ofrece un ahorro en la contratación de equipos de compactación para un trabajo en específico, se

recomienda emplear *OptimiAPP* en las diversas fases de un proyecto, sobre todo en la fase de elaboración del presupuesto base, a fin de optimizar los procesos y mejorar la presupuestación de partidas relacionadas a la compactación y estabilización de suelos, generando así un ahorro al estado y que este canalice tal monto en otros proyectos tan necesarios para el país.

7. Las obras civiles y mineras deben integrar el aspecto medioambiental, social y económico en todo el ciclo de vida, es decir, desde la concepción del proyecto, el desarrollo de ingeniería, la construcción y en la operación debido a los altos niveles de contaminación existentes en el país, la alta tasa de desempleo o trabajo mal remunerado y un desempleo creciente debido a la pandemia. Para enfrentar estos problemas y poder llegar a ser sostenibles en el tiempo el Estado debe establecer políticas que impulsen, promuevan y fiscalicen el desarrollo del mercado nacional, en cuanto a que la mano de obra especializada sea en mayor porcentaje del país. Esto tendrá como consecuencia la creación de nuevos puestos de trabajo, de manera directa e indirecta, creación de nuevas empresas y microempresas y nuevos mercados que estén a la par con la creciente necesidad de construir infraestructura vial que conecte a las regiones, provincias y distritos del Perú, así como también los trabajos de movimiento de tierras en el área civil y minera.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Android. (2020). *Guía del Usuario*. Recuperado de <https://developer.android.com/studio/intro>.
2. Berrocal, C. (2019). *Comparación del Deflectómetro de Peso Liviano (LWD) con el Método Nuclear y Método del Cono de Arena* (Tesis de pregrado). Universidad Continental, Huancayo, Perú.
3. Caterpillar. (2000). *Manual de Rendimiento*. Illinois, EEUU: Caterpillar.
4. Caterpillar. (2013). *Guía para la Compactación de Suelos*. Illinois, EEUU: Caterpillar.
5. Das, B. (2006). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. México DF, México: Cengage Learning.
6. Das, B. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México DF, México: Cengage Learning.
7. García, J. (2017). *Productividad de Equipo Pesado en Obras de Movimiento de Tierras* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
8. GyM, S. A. (2018). *Línea Amarilla ya es una realidad*. Recuperado de <https://www.gym.com.pe/novedades/noticias/L%C3%ADnea-Amarilla-ya-es-una-realidad->.
9. Guardian Tech. (2018). *Web Hosting Derives The Web Services Concept*. Recuperado de <https://medium.com/@guardiantech1/web-hosting-derives-the-web-services-concept-baa1e75baefd>.
10. Guio, V. (2001). *Productividad en Obras de Construcción*. Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
11. Hillier, F., Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México DF, México: Mc Graw Hill.
12. Izquierdo, D., & Ruiz, J. (2020). *Teoría del Método Simplex*. Recuperado de <http://www.phpsimplex.com>.
13. Kong, M. (2010). *Investigación de Operaciones*. Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
14. Lamsac. (2016). *Estudio Definitivo del Proyecto LÍNEA AMARILLA*. Lima, Perú.
15. Lloret, P. (2009). *Máquinas de Obras Públicas II*. Madrid, España: Editorial Club Universitario.

16. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. Lima, Perú: MTC.
17. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción*. Lima, Perú: MTC.
18. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima, Perú: MTC.
19. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016). *Norma Técnica de Edificación G.050 Seguridad Durante la Construcción*. Lima, Perú: MVCS.
20. Norma Internacional ISO 9000. (2015). *Sistemas de Gestión de Calidad: Fundamentos y vocabulario*. Recuperado de <http://www.iso.org>.
21. PHP. (2004). *¿Qué es PHP?* Recuperado de <https://www.php.net/manual/es/intro-what-is.php>.
22. Project Management Institute. (2017). *Guía de Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®)*. Pensilvania, EEUU: Project Management Institute.
23. Ramos, J. (2012). *El Equipo y sus Costos de Operación*. Lima, Perú: Editorial CAPECO.
24. Real Academia Española. (2019). *Diccionario de la lengua española*. Madrid, España: RAE.
25. Rúa, D. (2017). *Modelo Matemático para la Optimización del Sistema de Abastecimiento de Agregados para Proyectos Viales* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
26. Salgado, A. (2016). *Programando con Java para Aplicaciones Android*. Recuperado de <https://www.coursera.org/specializations/programacion-android>.
27. Servicios Minería Inc., & Fluor. (2018). *Manual de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente - Quellaveco*. Moquegua, Perú: SMI.
28. Taha, H. (2004). *Investigación de Operaciones*. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación.
29. Torres, C., & Villanueva, H. (2014). *Diseño y Desarrollo de una Herramienta para el Dimensionamiento Óptimo de Flotas de Movimiento de Tierras en Obras Civiles* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Santa, Chimbote, Perú.

## ANEXOS

Anexo N°01. Principales comandos empleados para la programación del software.

- main ()

Es el nombre del método<sup>54</sup> que la máquina virtual busca para comenzar a ejecutar un programa.

- public ()

Modificador de acceso del método. Puede ser *public* (cualquier clase en cualquier paquete puede acceder al método), *private* (solo la misma clase usará el método) o *protected* (códigos generados dentro de la clase usados en el método).

- static ()

Indica que el método es estático, es decir, permanece invariable en su ejecución.

- void ()

Los métodos pueden devolver el resultado de una operación algebraica definida, pero hay métodos que solo ejecutan acciones. Estos se declaran con este comando como tipo de retorno.

- string ()

Comando que define cadenas de caracteres para mostrar en el código.

- if ()

Comando utilizado para tomar decisiones. Condicional que sirve para realizar operaciones en función a una expresión.

- do () while ()

Crea un bucle que ejecuta una sentencia específica hasta que la condición sea evaluada como falsa.

- array ()

Estructura de datos que permiten almacenar una serie larga de datos similares.

---

<sup>54</sup> En programación, método es una función cuyo interior tiene definido un conjunto de instrucciones. Puede requerir datos de entrada de distinto tipo para ejecutarse y devuelve un dato como resultado.

Anexo N° 02. Código fuente del software desarrollado *OptimiAPP*.

## • EQUIPO

```
package com.fpozo.optimizapp.model;import android.util.Log;
import org.json.JSONException;
import org.json.JSONObject;
import static com.ehuaranga.optimizapp.internaldb.OptimiAPPContract.DBRintisa.*;
public class Equipo {
    int id;
    String codigo;
    String tipoSuelo;// Granular, Semicohesivo, Cohesivo
    float porcentajeProctor; // 90 - 95%
    float anchoEfectivo; // Ancho del rodillo
    float velocidadOperacion; //km/h para mostrar pero almacenar metros/hora
    int numeroPasadas;
    float ancho;
    float largo;
    float distanciaLateral;
    float distanciaFrontal;
    float costo; //USD x hora
    float areaEquipoTrabajo; //calculado
    public Equipo() {
    }

    public Equipo(String codigo, String tipoSuelo, float porcentajeProctor, float ancho,
float largo,
        float distanciaFrontal, float distanciaLateral, float
areaEquipoTrabajo, float anchoEfectivo,
        float velocidadOperacion, int numeroPasadas, int costo) {
        this.codigo = codigo;
        this.tipoSuelo = tipoSuelo;
        this.porcentajeProctor = porcentajeProctor;
        this.ancho = ancho;
        this.largo = largo;
        this.distanciaFrontal = distanciaFrontal;
        this.distanciaLateral = distanciaLateral;
        this.anchoEfectivo = anchoEfectivo;
        this.velocidadOperacion = velocidadOperacion;
        this.numeroPasadas = numeroPasadas;
        this.costo = costo;}

    public int getId() {
        return id;}

    public void setId(int id) {
        this.id = id;}
```

```
public String getCodigo() {
    return codigo;}

public void setCodigo(String codigo) {
    this.codigo = código;}

public String getTipoSuelo() {
    return tipoSuelo;}

public void setTipoSuelo(String tipoSuelo) {
    this.tipoSuelo = tipoSuelo;}

public float getPorcentajeProctor() {
    return porcentajeProctor;}

public void setPorcentajeProctor(float porcentajeProctor) {
    this.porcentajeProctor = porcentajeProctor;}

public float getAnchoEfectivo() {
    return anchoEfectivo;}

public void setAnchoEfectivo(float anchoEfectivo) {
    this.anchoEfectivo = anchoEfectivo;}

public float getVelocidadOperacion() {
    return velocidadOperacion;}

public void setVelocidadOperacion(float velocidadOperacion) {
    this.velocidadOperacion = velocidadOperacion;}

public int getNumeroPasadas() {
    return numeroPasadas;}

public void setNumeroPasadas(int numeroPasadas) {
    this.numeroPasadas = numeroPasadas;}

public float getAncho() {
    return ancho;}

public void setAncho(float ancho) {
    this.ancho = ancho;}

public float getLargo() {
    return largo;}

public void setLargo(float largo) {
    this.largo = largo;}
```

```
public float getDistanciaLateral() {
    return distanciaLateral;}

public void setDistanciaLateral(float distanciaLateral) {
    this.distanciaLateral = distanciaLateral;}

public float getDistanciaFrontal() {
    return distanciaFrontal;}

public void setDistanciaFrontal(float distanciaFrontal) {
    this.distanciaFrontal = distanciaFrontal;}

public float getAreaEquipoTrabajo() {
    return (this.largo+2*this.distanciaFrontal)*(this.ancho+2*this.distanciaLateral);}

public void setAreaEquipoTrabajo(float areaEquipoTrabajo) {
    this.areaEquipoTrabajo = areaEquipoTrabajo;}

public float getCosto() {
    return costo;}

public void setCosto(float costo) {
    this.costo = costo;}

@Override
public String toString() {
    return "Equipo{" +
        "id=" + id +
        ", codigo='" + codigo + '\'' +
        ", tipoSuelo='" + tipoSuelo + '\'' +
        ", porcentajeProctor=" + porcentajeProctor +
        ", anchoEfectivo=" + anchoEfectivo +
        ", velocidadOperacion=" + velocidadOperacion +
        ", numeroPasadas=" + numeroPasadas +
        ", ancho=" + ancho +
        ", largo=" + largo +
        ", distanciaLateral=" + distanciaLateral +
        ", distanciaFrontal=" + distanciaFrontal +
        ", areaEquipoTrabajo=" + areaEquipoTrabajo +
        '}';
}

public JSONObject toJSON(){
    JSONObject jsonEquipo = new JSONObject();
    try {
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_CODIGO_EQUIPO, this.codigo);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_TIPO_SUELO_EQUIPO, this.tipoSuelo);
    }
```

```
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_PORC_PROCTOR_EQUIPO, this.porcentajeProctor);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_ANCHO_EFECTIVO_EQUIPO, this.anchoEfectivo);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_VELOCIDAD_OPERACION_EQUIPO,
this.velocidadOperacion);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_ANCHO_EQUIPO, this.ancho);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_LARGO_EQUIPO, this.largo);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_DISTANCIA_LATERAL_EQUIPO, this.distanciaLateral);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_DISTANCIA_FRONTAL_EQUIPO, this.distanciaFrontal);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_NUMERO_PASADAS_EQUIPO, this.numeroPasadas);
        jsonEquipo.put(COLUMN_NAME_COSTO_EQUIPO, this.costo);

    } catch (JSONException e) {
        e.printStackTrace();
    }
    return jsonEquipo;}

public float getPc(Proyecto proyecto){
    float W = this.anchoEfectivo;// - (float)0.15;
    float V = this.velocidadOperacion;
    float e = (float)proyecto.getEspesor()/(float)100.0;
    float E = proyecto.getFactorEficiencia();
    int N = this.numeroPasadas;
    float h = (float)proyecto.getAltura();
    if( h > 1000){
        h = (h-(float)1000.0)/(float)10000.0;
    }
    else{
        h = (float) 0.0;
    }

    Log.d("Equipo", "\n"+this.codigo+":\nW: "+ W+
        "\nV: " +V+
        "\ne: " +e+
        "\nE: " +E+
        "\nN: " + N+
        "\nh: " + h);
    float X = W*V*e*E/(N*(1+h));
    Log.d("Equipo", " Coeficiente: "+X);
    return X;
}
}
```

- PROYECTO

```
package com.fpozo.optimizapp.model;
import java.util.ArrayList;
public class Proyecto {
    int id;
    String titulo;
    String descripcion;
    int espesor;
    float factorEficiencia;
    int altura;//altura en metros
    float area;
    float mcc;
    float he;
    int jornadas;
    float t;
    String tipoSuelo;
    float proctor;
    ArrayList<Equipo> equipos;

    public Proyecto() {}

    public float getProctor() {
        return proctor;}

    public void setProctor(float proctor) {
        this.proctor = proctor;}

    public int getJornadas() {
        return jornadas;}

    public void setJornadas(int jornadas) {
        this.jornadas = jornadas;}

    public int getId() {
        return id;}

    public void setId(int id) {
        this.id = id;}

    public String getTitulo() {
        return titulo;}

    public void setTitulo(String titulo) {
        this.titulo = titulo;}

    public String getDescripcion() {
        return descripcion;}
```

```
public void setDescripcion(String descripcion) {
    this.descripcion = descripcion;}

public int getEspesor() {
    return espesor;}

public void setEspesor(int espesor) {
    this.espesor = espesor;}

public float getFactorEficiencia() {
    return factorEficiencia;}

public void setFactorEficiencia(float factorEficiencia) {
    this.factorEficiencia = factorEficiencia;}

public int getAltura() {
    return altura;}

public void setAltura(int altura) {
    this.altura = altura;}

public float getArea() {
    return area;}

public void setArea(float area) {
    this.area = area;}

public float getMcc() {
    return mcc;}

public void setMcc(float mcc) {
    this.mcc = mcc;}

public float getHe() {
    return he;}

public void setHe(float he) {
    this.he = he;}

public float getT() {
    return t;}

public void setT(float t) {
    this.t = t;}

public String getTipoSuelo() {
    return tipoSuelo;}
```

```
public void setTipoSuelo(String tipoSuelo) {
    this.tipoSuelo = tipoSuelo;}

public ArrayList<Equipo> getEquipos() {
    return equipos;}

public void setEquipos(ArrayList<Equipo> equipos) {
    this.equipos = equipos;}

@Override
public String toString() {
    return "Proyecto{" +
        "id=" + id +
        ", titulo='" + titulo + '\'' +
        ", descripcion='" + descripcion + '\'' +
        ", espesor=" + espesor +
        ", factorEficiencia=" + factorEficiencia +
        ", altura=" + altura +
        ", area=" + area +
        ", mcc=" + mcc +
        ", he=" + he +
        ", jornadas=" + jornadas +
        ", t=" + t +
        ", tipoSuelo='" + tipoSuelo + '\'' +
        ", proctor=" + proctor +
        ", equipos=" + equipos +
        '}';}
}
```

Fuente: Elaboración Propia



Anexo N° 03. Costo Hora-Hombre para trabajadores de construcción civil para el año 2017.

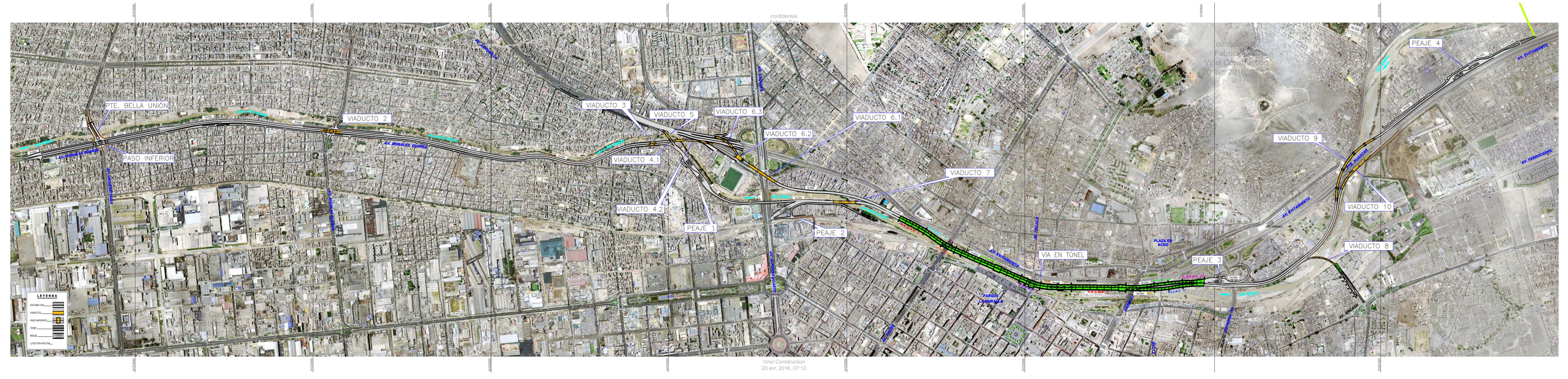
CUADRO DE JORNALES VIGENTES A SETIEMBRE 2017  
ACTA FINAL DE NEGOCIACION COLECTIVA EN CONSTRUCCION CIVIL 2017-2018  
EXPEDIENTE N 142-2017-MTPE/2.14-NC

DESCRIPCION	CATEGORIA						
	OPERARIO	OFICIAL	PEON	OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	OPERADOR DE EQUIPO PESADO	OPERARIO ELECTRO MECANICO	
REMUNERACIÓN BÁSICA VIGENTE (RB) (vigente del 01.06.15 al 31.05.16)	64.30	52.00	46.50	64.30	64.30	64.30	
BONIFICACIÓN UNIFICADA DE CONSTRUCCIÓN (BUC) (vigente del 01.06.15 al 31.05.16)	20.58	15.60	13.95	20.58	20.58	20.58	
BONIFICACIÓN POR ALTA ESPECIALIZACIÓN OPERADOR EQUIPO MEDIANO OPERADOR EQUIPO PESADO OPERARIO ELECTROMECANICO				5.14	6.43	9.65	
<b>BONIFICACION POR ALTITUD (*)</b>	-	-	-	-	-	-	
LEYES Y BENEFICIOS SOCIALES SOBRE LA RB	67.44	54.54	48.77	67.44	67.44	67.44	
LEYES Y BENEFICIOS SOCIALES SOBRE EL BUC	2.42	1.84	1.64	2.42	2.42	2.42	
SEGURO DE VIDA ESSALUD - VIDA (S/. 5.00 / mes)	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	
BONIFICACIÓN POR MOVILIDAD ACUMULADA (CPASAJE S/. 1.29)	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	
OVERROL (02 x S/. 88.23)	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	
Total día de 8 horas	163.22	132.46	119.34	168.36	169.65	172.86	
Costo Hora Hombre (HH) S/.	20.40	16.56	14.92	21.05	21.21	21.61	

Fuente: CAPECO (2017)

Anexo N° 04. Mapa general del proyecto Línea Amarilla (Plano A03).

Fuente: Elaboración Propia



**LEYENDA**

SISTEMA VIAL	
VIADUCTO	
PASO INFERIOR	
TÚNEL	
PEAJE	
LOTES POR AFECTAR...	

confidencial  
Fabrica Cao

confidencial  
Fabrica Cao  
Vinci Construction  
20 avr. 2016, 07:12

Vinci Construction  
20 avr. 2016, 07:12

PTE. BELLA UNIÓN

PASO INFERIOR

VIADUCTO 2

VIADUCTO 3

VIADUCTO 5

VIADUCTO 6.3

VIADUCTO 6.2

VIADUCTO 6.1

VIADUCTO 4.1

VIADUCTO 4.2

PEAJE 1

PEAJE 2

VIADUCTO 7

VÍA EN TÚNEL

PEAJE 3

VIADUCTO 9

VIADUCTO 10

VIADUCTO 8

PEAJE 4

E-271000  
E-272000  
E-273000  
E-274000  
E-275000  
E-276000  
E-277000  
E-278000  
E-279000  
E-280000

AV. MORALES DUÁREZ  
AV. EVITAMIENTO  
AV. HUASCAR  
AV. FERROCARRIL  
AV. ANCASSH  
AV. TRUJILLO  
AV. DE LA UNIÓN  
AV. DE LA AMISTAD  
AV. DE LA COOPERACIÓN  
AV. DE LA SOLIDARIDAD  
AV. DE LA JUSTICIA  
AV. DE LA PAZ  
AV. DE LA LIBERTAD  
AV. DE LA VERDAD  
AV. DE LA FORTALEZA  
AV. DE LA ESPERANZA  
AV. DE LA FE  
AV. DE LA CARIDAD  
AV. DE LA COMPASIÓN  
AV. DE LA MISERICORDIA  
AV. DE LA BONDAD  
AV. DE LA GRACIA  
AV. DE LA GLORIA  
AV. DE LA HONRA  
AV. DE LA REVERENCIA  
AV. DE LA RESPECTABILIDAD  
AV. DE LA ESTIMACIÓN  
AV. DE LA ADMIRACIÓN  
AV. DE LA VENERACIÓN  
AV. DE LA REVERENCIA  
AV. DE LA RESPECTABILIDAD  
AV. DE LA ESTIMACIÓN  
AV. DE LA ADMIRACIÓN  
AV. DE LA VENERACIÓN

E-281000  
E-282000  
E-283000  
E-284000  
E-285000  
E-286000  
E-287000  
E-288000  
E-289000  
E-290000