

Proyecto Fin de Máster Ingeniería Industrial

Optimización de las Operaciones de Movimiento de Tierras en Obras de Caminos mediante Técnicas de Investigación Operativa

Autor: Ignacio Castellano Jiménez

Tutor: Gabriel Bravo Aranda

**Dpto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos
de Ingeniería**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Optimización de las Operaciones de Movimiento de Tierras en Obras de Caminos mediante Técnicas de Investigación Operativa

Autor:

Ignacio Castellano Jiménez

Tutor:

Gabriel Bravo Aranda

Profesor titular

Dpto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: Optimización de las Operaciones de Movimiento de Tierras en Obras de Caminos mediante Técnicas de Investigación Operativa

Autor: Ignacio Castellano Jiménez

Tutor: Gabriel Bravo Aranda

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mi madre, a mi padre, a mi
hermana María, a mi hermano
Javier, a mi hermano Gonzalo, a
mis abuelos, tíos y primos, a
Claudia, a mis amigos. A los que
ya no están.*

*A don Gabriel por su paciencia y
ayuda constante*

Gracias

Índice

Índice	viii
Índice de Figuras	xi
Abstract	xiii
1 Objetivos y Alcance del TFM	1
2 Introducción	3
2.1 <i>Evolución de los equipos mecánicos</i>	4
2.2 <i>El Proyecto de Carreteras</i>	4
3 Movimiento de tierras en obras Lineales. Las Obras de Caminos	7
3.1 <i>La Obra de Tierras. Explanaciones</i>	7
3.1.1 <i>Sistemas de drenaje en carreteras</i>	8
3.2 <i>Consideraciones medioambientales</i>	9
3.3 <i>Estudio de la obra</i>	10
3.3.1 <i>Planificación de las operaciones de movimiento de tierras</i>	11
3.3.2 <i>Naturaleza de los trabajos</i>	12
3.3.3 <i>Clasificación de suelos</i>	12
3.4 <i>Representación del proyecto</i>	13
3.4.1 <i>Planos de Planta</i>	14
3.4.2 <i>El Perfil Longitudinal del Terreno</i>	15
3.4.3 <i>Perfiles Transversales</i>	16
3.5 <i>Ejecución de las obras</i>	16
3.5.1 <i>Trabajos previos</i>	17
3.5.2 <i>Operaciones de movimiento de tierras</i>	19
3.5.3 <i>Maquinaria de obra</i>	22
3.5.4 <i>Rendimiento y coste de los trabajos</i>	31
4 Cálculo de Volúmenes y Compensación de Tierras	33
4.1 <i>Cálculo de áreas</i>	33
4.2 <i>Cálculo de volúmenes entre perfiles transversales</i>	34
4.3 <i>Organización de los cálculos</i>	35
4.4 <i>El Diagrama de Masas y su utilidad</i>	36
4.5 <i>Otros métodos de estudio de la compensación y de la planificación de los trabajos</i>	38
5 Aplicación de Técnicas de Investigación Operativa al transporte de tierras en obras de caminos	39
5.1 <i>El modelo utilizado</i>	40
5.1.1 <i>Datos de entrada</i>	42
5.1.2 <i>Variables del problema</i>	43
5.1.3 <i>La Función Objetivo</i>	43
5.1.4 <i>Restricciones del Modelo</i>	44
6 Aplicación del Modelo al MdT de obras concretas	52
6.1 <i>Software empleado</i>	52
6.1.1 <i>Interfaz con Excel</i>	54
6.2 <i>Preparación de los datos</i>	56
6.3 <i>Problemas de estudio</i>	58
6.3.1 <i>Resultados obtenidos y comparación con el Diagrama de Masas</i>	60
7 Resumen y Conclusiones	73
8 Desarrollos futuros	74
9 Bibliografía	76

Anexo A. El Modelo de Optimización aplicado a los problemas propuestos	
Anexo B. El Modelo de Optimización: lectura desde un fichero.xlsx	
Anexo C. El Modelo de Optimización aplicado a la Variante de las Cabezas.....	
Anexo D. Resultados Obtenidos. Variante de Las Cabezas	
Anexo E. Representación gráfica de los problemas resueltos	

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 – Geotecnia del Corredor. Variante de las Cabezas	10
Ilustración 2 – Vista en Planta. Variante de las Cabezas	14
Ilustración 3 – Vista en Perfil de un trazado	15
Ilustración 4 – Perfiles transversales en obras de caminos	16
Ilustración 5 – Representación de una obra de drenaje transversal en carreteras	19
Ilustración 6 – Mototraílla Caterpillar	24
Ilustración 7 – Buldóceres trabajando en paralelo	25
Ilustración 8 – Pala cargadora sobre ruedas durante la operación de carga de tierras	26
Ilustración 9 – Excavadora Caterpillar durante los trabajos	28
Ilustración 10 – Camión bañera acarreando tierras	29
Ilustración 11 – Compactador de rodillo liso Caterpillar	30
Ilustración 12 – Representación de la curva de volúmenes en base a un perfil dado	34
Ilustración 13 – Diagrama de Masas Suelo Tolerable. Variante de las Cabezas	38
Ilustración 14 – Ubicación del vertedero municipal del Caño Palmilla. Variante de las Cabezas	60
Ilustración 15 – Perfil longitudinal de terreno. Problema propuesto n°2	61
Ilustración 16 – Balance de Masas. Problema propuesto n°2	62
Ilustración 17 – Perfil longitudinal de terreno. Problema propuesto n°3	64
Ilustración 18 – Balance de Masas. Problema propuesto n°3	65
Ilustración 19 – Balance de Masas. Problema propuesto n°7	67
Tabla 1 – Contraste de costes con el Diagrama de Masas	70
Tabla 2 – Valoración de los costes acumulados	71
Tabla 3 – Contraste del Plazo de la Ejecución de la Obra	71
Tabla 4 – Tendencias en los Plazos de Ejecución	72

Abstract

This Project aims to provide a solution to the problem of earth moving in road construction. The objective is the development of a linear programming model that resolves the problem of machinery assignation and soil compensation among sections in highway construction. The model optimizes the cost associated to the works, that is, maximizes the profit generated.

This method of earthwork planning will be tasted in a set of simple problems of road construction and in a real project. We will contrast its results with those obtained with that application of the Mass Diagram, the most used planning tool in the sector nowadays.

The model parts from an already designed trace of the road and the data provided by the engineering department in relation to availability of equipment, its mechanical characteristics, the type of soils and the volumes of material available or needed in every section consider along the road.

It considers borrow pits and disposal sites for the surplus or shortfall of usable material in the excavation, respectively.

It does not calculate the size of the fleet necessary to execute the works.

The model does not consider the cost of every earthmoving operation, it just estimates excavation of material and transport works, leaving aside the cost of levelling and compacting the soil. It does not consider the cost of soil stabilization either.

The model provides the duration of the works, which is a consequence of the assignation made based on the cost, that is, the duration is not optimized.

1 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TFM

La ejecución de proyectos de obras lineales de caminos requiere del trabajo conjunto y la coordinación de un amplio grupo de personas y empresas intervinientes el proyecto que avanzan hacia un mismo objetivo, la terminación de la obra dentro de los límites acordados entre las partes.

El proyecto comienza con la fase de diseño y pre-construcción, en la que se define el proyecto de ejecución de la obra y se realizan los trámites legales necesarios para dar comienzo al proyecto; a esta fase la siguen los trabajos de construcción de la explanación de la carretera (fase de obra), y el proyecto termina con las gestiones de la post-construcción, tras la finalización de la obra, donde se reciben los trabajos de los contratistas y se trabaja vistas a dar comienzo a la actividad.

Las operaciones de movimiento de tierras son una parte fundamental en las obras de caminos. Se trata del conjunto de trabajos que permiten modificar la geometría del terreno existente a lo largo del trazado de la carretera. Estos trabajos abarcan las operaciones de excavación, carga, transporte, descarga, extendido y compactación de las tierras, y su ejecución ocupa gran parte de la duración del proyecto y representan el grueso del presupuesto de la obra. El resultado final es la construcción de la explanación de la carretera.

El estudio de las asignaciones de material entre diferentes puntos del trazado es el centro de la planificación de las obras que debe realizar el constructor del proyecto. Existen dos métodos tradicionalmente conocidos a la hora de abordar este estudio: el diagrama de masas y las técnicas de programación lineal.

El Diagrama de Masas es una herramienta gráfica muy útil, que refleja el volumen de excavación acumulado a lo largo del trazado. Apoyándose en las distancias económicas de acarreo de los equipos disponibles, permite definir los transportes del material aprovechable de la excavación a las zonas de ejecución de rellenos, estableciendo zonas de trabajo por equipos dentro de la obra. Sin embargo, su aplicación se ve limitada en determinadas situaciones de obra, como cuando confluyen varios tipos de suelos en la traza, cuando la geometría del terreno es compleja, en situaciones donde disponemos de diferentes equipos para asignar a los trabajos o cuando se consideran diferentes puntos de préstamo y vertido de tierras en dentro y fuera del trazado de la obra.

De esta forma, y partiendo de otros estudios previos en la materia, el objetivo del Proyecto es la presentación de un Modelo matemático que, mediante la aplicación de técnicas de programación lineal permite dar una solución al problema de la compensación longitudinal de volúmenes a lo largo del trazado.

El Modelo busca optimizar el coste de ejecución de las obras de explanación en la carretera, pero con un objetivo claro, la necesidad de encontrar una buena solución y que ésta pueda trasladarse a la realidad de la obra de manera efectiva.

Partimos de un proyecto de ejecución por el que conocemos el trazado de la carretera, las características de los suelos empleados, las cubriciones de volúmenes en la traza y la ubicación de las zonas de préstamos y vertederos. También conocemos los equipos de obra con los que dispone el contratista para la ejecución de los trabajos.

Conocemos las características mecánicas de los equipos que pudieran realizar los trabajos. El Modelo no entra en el estudio de las velocidades de acarreo en la traza. Partimos de la suposición de que estas velocidades nos son proporcionadas después de haberse analizado correctamente el relieve del terreno a lo largo del trazado, es decir, las pendientes existentes y la tracción de los suelos presentes en la traza.

El modelo se adapta a la tendencia actual de maximizar el aprovechamiento de las tierras de la propia excavación con el objetivo de reducir el impacto en el entorno.

Definimos costes unitarios variables para cada trayecto posible dentro de la obra, desde los puntos de excavación a rellenos, y también para los transportes a préstamos y vertederos, en función de las distancias de transporte, el equipo utilizado y el tipo de material acarreado.

Se trata de minimizar el coste total asociado a las operaciones excavación y transporte de tierras en la obra, sin considerar el coste de los trabajos de compactación, estabilización de materiales y construcción de la capa de firme de la carretera. El resultado del modelo es la definición de los transportes de materiales que deberán realizarse durante la construcción de la explanación de la carretera, y que aseguran el menor coste en los trabajos.

Se trata de un modelo versátil, que podemos adaptar de manera sencilla a las condiciones existentes en cada problema concreto.

Como herramienta de soporte para el desarrollo del Modelo se ha utilizado el software GAMS. Se trata de un lenguaje de programación potente, con una interfaz intuitiva que nos permite modelar el problema de manera relativamente sencilla e interpretar de forma clara los resultados.

Aplicaremos el modelo a un conjunto de problemas propuestos de movimiento de tierras y posteriormente contrastaremos sus resultados con los obtenidos mediante la aplicación del método del Diagrama de Masas. Finalmente, probamos el Modelo en un proyecto de carreteras real, el proyecto de la Variante de las Cabezas de San Juan en la A-341. La utilización de hojas de cálculo se antoja fundamental a la hora de tratar los datos que luego se introducirán en el Modelo.

La estructura de Proyecto se ha organizado de forma que en los primeros capítulos se explican las características principales de las Obras de Caminos, su ejecución, el cálculo de volúmenes en la obra y las principales herramientas gráficas y de planificación que se utilizan en la actualidad. A continuación, presentamos el Modelo de programación lineal que hemos desarrollado, como se preparan los datos del problema para que puedan ser leídos correctamente y su aplicación en GAMS.

Después comentaremos los resultados obtenidos de su aplicación y terminaremos con las conclusiones del Proyecto y las propuestas de mejora para siguientes trabajos.

2 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la segunda mitad del siglo XX se produjo un desarrollo muy importante en la construcción de carreteras en el conjunto de países de la actual Unión Europea, como consecuencia del desarrollo de la actividad económica y del crecimiento demográfico que surgieron en un periodo de mayor estabilidad tras los años de guerra. Este crecimiento, sin embargo, no se ha detenido, siendo el transporte por carretera uno de los motores de la economía global, apoyado en la adopción de nuevas políticas de apertura de fronteras, como el derecho a la libre circulación de mercancías en el mercado interior, o la libre circulación de personas dentro de la UE.

De este modo, la evolución en el sector de la ingeniería civil, y en concreto los proyectos de obras de carreteras no ha cesado, con nuevos métodos y tecnologías aplicadas cada vez más desarrollados. Estos sistemas han evolucionado en la búsqueda de la eficiencia en la ejecución del proyecto, como consecuencia de las exigencias a las que se enfrenta el constructor en términos de costes, calidad en la ejecución, tiempos... además de consideraciones urbanísticas y medioambientales. Los tiempos que se manejan en los procesos de licitación tampoco favorecen a los departamentos técnicos de las empresas constructoras en la presentación de ofertas bien estudiadas, por lo que en muchos casos se recurre a la experiencia en proyectos similares, llevando al contratista a asumir situaciones que quizás luego no se correspondan con la realidad de la obra. La competencia existente también es importante, llevando al límite los precios ofertados. Todo esto repercute en menores márgenes para el constructor, que en muchos casos se ve obligado a ofertar en pérdidas con el objetivo de adjudicarse un determinado proyecto que le aporte reconocimiento y prestigio, debiendo luego hacer cuantas maniobras sean necesarias para poder salvarlo, lo que en la mayoría de los casos no se termina consiguiendo.

Es en este contexto de incertidumbre y riesgo que asume el constructor a la firma del contrato aparecen nuevas herramientas de planificación, como los modelos matemáticos de programación lineal, que permiten realizar una estimación aproximada del coste de ejecución de la obra.

Como sabemos, ningún proyecto es idéntico a otro, como tampoco lo son proyectos de caminos. Todos presentan alguna particularidad que los hace diferentes, ya sea su localización, que puede influir en las características del terreno existente, el nivel freático en la zona, los tiempos de aprovisionamiento de maquinaria, la existencia de otras infraestructuras a lo largo del trazado de la carretera e incluso las personas intervinientes que participan en el proyecto.

Las técnicas de programación lineal vienen desarrollándose a lo largo de los años en la búsqueda de una herramienta, que favorezca la realización de estimaciones del coste y ayude en la planificación y organización de los trabajos en la obra. No obstante, hasta ahora su utilización no está muy extendida, a pesar de los muchos artículos de investigación y de las pruebas realizadas que coinciden en los beneficios económicos que derivan de su utilización. El coste de adquisición de estas tecnologías, la falta de personal cualificado para su utilización dentro de la propia empresa o el miedo al cambio, a hacer las cosas de manera diferente a como se han hecho siempre, llevan a las empresas constructoras a mirar con recelo estos nuevos avances. A esto se une en muchos casos la dificultad de trasladar las soluciones de los modelos a la realidad de la obra. Los modelos, sin embargo, también están limitados, ya que por mucho que queramos, no podemos predecir las condiciones meteorológicas u otras situaciones que generen paradas o repercutan directamente en el desarrollo de la obra.

Lo que buscamos en este Trabajo es proponer un modelo de optimización de las asignaciones de materiales durante los trabajos de explanación de la carretera que sea capaz de proporcionar una solución práctica para su aplicación en campo, y que esta solución resulte en beneficios tanto para el contratista como para el promotor del proyecto.

2.1 Evolución de los equipos mecánicos

Tradicionalmente, en las obras lineales de construcción de carreteras la mano de obra era el recurso fundamental, y las operaciones de excavación de las tierras, carga, transporte y nivelación de las tierras de forma manual. Requerían por tanto de equipos de personas enormes para alcanzar unos niveles de producción y avance de los trabajos aceptables. No fue hasta finales del siglo XIX, y aprovechando el impulso económico de la época, cuando comenzaron a aparecer en Estados Unidos los primeros equipos mecánicos con vistas a su aplicación en la industria de la construcción, en concreto, en las obras de vías férreas, con el objetivo de mejorar los niveles de producción y disminuir los costes de la ejecución.

Dado que los grandes proyectos de construcción favorecen un entorno de innovación y cambio, la expansión de las redes de tren que comenzó en Estados Unidos y Gran Bretaña impulsó el desarrollo de nuevos equipos de trabajo. Se trataba de palas excavadoras accionadas con máquina de vapor (steam shovels), que utilizaban la presión generada por el vapor para producir trabajo, y se instalaban sobre raíles que permitían su desplazamiento. Estos raíles se montaban en el lugar donde estaba previsto que la máquina desarrollara su tarea, y luego se reposicionaban para continuar con los trabajos en otro punto de la obra. Otros grandes proyectos como la excavación del canal de Panamá impulsaron la producción de estos equipos, que se convirtieron en un recurso habitual en la ejecución de las operaciones de excavación de tierras. El desarrollo demográfico de las principales ciudades de Norte América propició su uso en la excavación de los cimientos de los primeros rascacielos.

La evolución de estos equipos continuó con modelos que incorporaban cadenas para su desplazamiento y, en 1884, se desarrolló en Inglaterra la primera pala giratoria de 360°. Las palas de vapor continuaron en funcionamiento hasta 1930, cuando fueron suplantadas por la aparición de modelos más eficaces y económicos, equipados con motores diésel de combustión interna, que serían los precursores de los modelos existentes en la actualidad. Tras la II Guerra Mundial, tuvo lugar un nuevo impulso en la construcción de carreteras que derivó en un mayor desarrollo e innovación en los equipos mecánicos. Los tres avances fundamentales que datan de este momento y que impulsaron la producción de los equipos de obra fueron: la invención de nuevos aceros, que reducían considerablemente el peso de los equipos sin afectar a la durabilidad de los equipos, la incorporación de hilos de nylon en las estructuras de los neumáticos, y el desarrollo de motores diésel de alta eficiencia.

Actualmente, no se visualizan grandes cambios para la maquinaria en el horizonte. Sin embargo, los fabricantes no están parados, y continuamente se mejoran y optimizan los modelos existentes, incorporando nuevos materiales a la fabricación y herramientas y neumáticos de mayor rendimiento.

2.2 El Proyecto de Carreteras

Cualquier proyecto, desde la construcción de una planta industrial a una vivienda unifamiliar, pasando por un proyecto de restauración global de un edificio o una pequeña reforma debe ser aprobado y obtener las licencias oportunas y permisos necesarios para dar comienzo a los trabajos. Los trámites legales de gestión y obtención de estos permisos suelen dilatarse en el tiempo en la mayoría de los casos. Por esta razón, es importante presentar toda la documentación necesaria en el mismo momento y que ésta esté bien documentada.

En muchos casos, el principal problema de un proyecto no es el coste que pueda suponer, si no el tiempo. Lo que hoy puede costar tanto mañana puede cambiar, condicionando así el inicio de la obra. Por ejemplo, la capacidad de la empresa constructora para trasladar personal a la obra puede ser menor a unos meses vista, pueden darse situaciones donde la inestabilidad del mercado no permita a los proveedores mantener sus precios, y que esto obligue a dejar contratos abiertos a revisión antes del inicio del proyecto, aumentando de esta forma el riesgo del promotor y, por lo tanto, el inicio del proyecto. En el caso de un proyecto de edificación, los trabajos de ventas del departamento comercial, basados en un estudio del mercado en el momento actual, también pueden verse afectados por fluctuaciones en el precio de la vivienda al comienzo y al finalizar el proyecto (ya que el proceso de ventas empieza antes de comenzar los trabajos, en base a la documentación contractual que aportan los renders del proyecto).

Como se puede observar, en un proyecto intervienen muchas personas que, interesadas en su realización, trabajan en una misma dirección y velan por que el proyecto llegue a buen puerto. Estas personas o partes

interesadas son: el promotor del proyecto, la dirección facultativa de la obra, el contratista y subcontratistas y la sociedad, con carácter general.

El Promotor del proyecto es la persona, por cuenta de la cual se inicia el proyecto y es quien coordina a todas las partes intervinientes para trabajar sobre una idea hasta el punto en que pueda ejecutarse. Es la persona física o jurídica que asume el coste global del proyecto y, por lo tanto, el principal interesado en su resultado final. Una vez terminado, el proyecto lo tendrá en propiedad. En proyectos de índole nacional, como los proyectos de obras de carreteras, es la Administración del Estado, por medio del Ministerio de Fomento, quien hace las veces de Promotor. En ocasiones, el Promotor, puede trasladar a la obra a un equipo técnico propio a fin de velar por el buen desarrollo del proyecto, en cuanto a ejecución de los trabajos, cumplimiento de los estándares de seguridad, seguimiento de la planificación, control de costes, coordinación de los trabajos, etcétera.

Actualmente, y por la inversión que suponen, los proyectos de carreteras se suelen dividir en fases, que posteriormente se llevan a licitación por separado. Antes de finalizar la primera fase de las obras, y siempre que el promotor decida continuar con el proyecto, se lleva a licitación o subasta el siguiente tramo de ejecución. Esto puede tener ciertas ventajas para el promotor de la obra, en tanto que la inversión inicial realizada no es tan elevada, de modo que el riesgo que asume es menor, y se reducen las interferencias de la obra con otras vías o servicios. Sin embargo, el hecho de adjudicar los trabajos por fases, en diferentes momentos a lo largo del tiempo, puede conllevar aumentos en los costes de ejecución, por motivo de la inflación o como consecuencia de un periodo de inestabilidad internacional, respecto a los costes asociados a una adjudicación “llave en mano” de la obra completa.

El soporte legal, técnico y de cálculo del proyecto se conoce como proyecto de ejecución material (PE). Redactado por un arquitecto o ingeniero, en el caso de naves industriales y proyectos de obra civil, como en el caso de una obra de caminos, contiene toda la información necesaria que define la obra: la memoria del proyecto, planos, el estudio de detalle, el estudio de seguridad y salud de la obra, el informe geotécnico y los proyectos de estructuras e instalaciones.

La dirección facultativa (DF), formada por el arquitecto o ingeniero proyectista y los aparejadores (dirección de obra y dirección de ejecución), es la responsable del diseño y de que se cumplan las especificaciones del proyecto, en calidad, tiempo y plazo. Deberá estar presente en la obra de manera habitual y mantener reuniones con el contratista del proyecto a fin de asegurar que se alcancen los requisitos constructivos establecidos. De igual forma, deberá informar periódicamente al promotor del proyecto de los avances en la construcción, así como de las incidencias y retrasos que se hayan producido o pudieran producirse. Las órdenes o puntualizaciones indicadas por la DF, marcadas en el Libro de Órdenes de la obra deberán seguirse, en cualquier caso. En el caso de que estas órdenes obedezcan a cambios en el proyecto, o modificaciones en el alcance de los trabajos, el contratista podrá solicitar la revisión de precios que ello conlleve, y se le abonará a mayores o menores según sea el caso.

Es importante mencionar en este punto la importancia que actualmente tiene el Coordinador de Seguridad y Salud (CSS) del proyecto. Se trata de la persona encargada de velar por la seguridad en la obra, asegurando que se siguen las medidas de seguridad aprobadas en el Plan de Seguridad y Salud (PSS) presentado por el Contratista. Es la máxima responsabilidad del Proyecto en materia de seguridad, todas sus indicaciones a este respecto deberán seguirse, aunque esto suponga un incremento del alcance en las partidas de seguridad, y podrá expulsar de la obra e incluso pararla en el caso de que no se estén tomando las medidas de seguridad descritas en el Estudio de Seguridad y Salud (ESS) del proyecto. Deberá tener reuniones frecuentes con el Contratista, para conocer los trabajos que se realizarán con antelación, y poder así monitorizar y comprobar que se respetan y siguen las premisas establecidas en materia de seguridad.

El Contratista es la persona a la que se encarga la realización del proyecto, siendo responsable, por tanto, del resultado de la ejecución. Puede contar con personal propio para la realización de la obra, o subcontratar a otras empresas (empresas subcontratistas) especializadas la realización de ciertos trabajos. Deberá conocer el proyecto de primera mano, asegurar la buena ejecución de los trabajos contratados, plantear las dudas que se le planteen, tanto a la DF como al promotor, seguir estrictamente el PSS y velar por que las subcontratas también lo hagan.

El Promotor de la obra, por tanto, encarga al Contratista la ejecución de la obra. Entre las dos partes se establece un acuerdo legal que se plasma en la firma del contrato de obras. El precio final del contrato incluye los gastos generales (trabajos de gestión) y el beneficio industrial. A esto se le llama el presupuesto de ejecución por contrata (PEC). Los valores generalmente adoptados en concepto de gastos generales y beneficio industrial son

el 13% y el 6% del presupuesto de ejecución material, respectivamente.

Los contratos de obra llave en mano, muy utilizados en la actualidad, se basan en la idea del contratista único. Se trata de una modalidad de contrato adecuada para clientes con poca experiencia en gestión de proyectos. El promotor recibe el proyecto una vez terminado y con las licencias pertinentes para que pueda comenzar a funcionar. Estos contratos, sin embargo, implican un riesgo mayor para el contratista de la obra, de manera que tienden a repercutir en el precio final de los trabajos el riesgo que asumen. Una vez adjudicado, el contrato se ejecuta la obra en base a un precio cerrado. Puede estar sujeto a revisiones de precio si lo aceptan ambas partes a la firma del contrato. Se trata de un sistema muy utilizado por las grandes empresas constructoras, por su capacidad para estimar sus costes de manera precisa, como consecuencia de los acuerdos que mantiene con otras empresas productoras y de mano de obra.

3 MOVIMIENTO DE TIERRAS EN OBRAS LINEALES. LAS OBRAS DE CAMINOS

Las obras de construcción de carreteras, vías férreas, canales y excavación en zanjas para alojar canalizaciones, se engloban en el concepto de obras lineales. La característica fundamental que se atribuye a estas obras es la modificación en la geometría del terreno a lo largo de una línea que define el trazado de la actuación.

En nuestro proyecto nos centramos en el estudio de las obras lineales de caminos, que incluyen el conjunto de operaciones de movimiento de tierras que actúan sobre la geometría del terreno existente para adaptarla a la geometría final deseada.

El resultado de la fase inicial de diseño es el trazado de la carretera. El trazado se corresponde con el recorrido en planta de la carretera y marca la posición en planta y alzado de la rasante del camino, que se corresponde con línea alzada que dibuja el eje de la explanada a lo largo de su recorrido. En base a la geometría final de la explanación a lo largo del trazado, se generan intersecciones con el terreno natural existente por las que se definen los tramos en excavación y las zonas de terraplenado en la traza.

La construcción de la explanación o plataforma, que constituye la estructura de apoyo del firme de la carretera, exige, por tanto, la modificación del relieve del terreno, que se consigue mediante el trasvase de volúmenes de unos puntos a otros dentro de la obra. La ejecución de la explanación requiere un trabajo previo de selección de los equipos y del método constructivo que se llevarán a la obra, y puede requerir el empleo de materiales procedentes de préstamos y/o la modificación de los suelos de excavación.

A continuación, se explican las características de las explanaciones y sus partes.

3.1 La Obra de Tierras. Explanaciones

Como hemos comentado, el terraplén es el resultado final de los trabajos de explanación en una obra lineal de caminos. La construcción de explanaciones es un trabajo complejo que requiere de técnicos cualificados y empresas especializadas en la materia para que el resultado final sea el deseado. Estos trabajos suponen la mayor parte de la duración del proyecto y la partida más importante de la obra, junto con la construcción del paquete del firme. En función del terreno existente y el trazado de diseño de la carretera la organización de la obra y la complejidad de los trabajos serán mayores o menores, y esto irá en línea con el coste de la ejecución. Terrenos malos, inadecuados para su utilización como material de relleno o de difícil excavación, la dificultad en el acceso a la obra debiendo ser necesario construir pistas de acceso, suponen un incremento en el coste asociado a los trabajos.

La construcción de la explanada agrupa los trabajos de desmonte del terreno y ejecución de rellenos, además de los trabajos de compactación y refinado de las tierras.

Las diferentes zonas que constituyen la estructura de la explanada, atendiendo a las características de sus materiales constituyentes y a la función que deben cumplir son: el cimientado, el arranque, el núcleo, los espaldones y la coronación.

El cimientado constituye la primera capa del relleno. Apoya sobre el terreno existente una vez se ha retirado la capa superficial de tierra vegetal, y se ha compactado y escarificado el terreno subyacente. Su espesor suele ser aproximadamente un tercio de la altura del relleno, pudiendo ser mayor en algunos casos. Es la capa sobre la que recae todo el peso del terraplén. Por lo general se emplean para su construcción suelos catalogados como seleccionados, adecuados o tolerables. Podrá emplearse el suelo de excavación siempre que el estudio geotécnico

y los ensayos realizados avalen su uso. Cuando el empleo de los suelos de excavación no sea posible, deberán emplearse suelos adquiridos en préstamos. Su construcción deberá asegurar que se respetan los asentamientos máximos admisibles. Es importante en este punto explicar el concepto de capacidad de soporte de la estructura. La capacidad de soporte se conoce como la resistencia a la deformación de una capa de suelo bajo las cargas aplicadas. Puede ocurrir que una menor capacidad de soporte del terreno donde apoya el relleno pueda suponer deslizamientos o implicar posibles deformaciones con el tiempo. Deberá definirse correctamente, por lo tanto, la profundidad de la capa de terreno natural que asegura una capacidad de soporte suficiente para que estos hechos no ocurran.

La capa de arranque es la capa del relleno inmediatamente por encima del cimiento. Su altura varía de entre uno y dos metros. En función de su apoyo en el terreno puede ser necesario tomar determinadas precauciones geométricas. En los casos en los que el relleno descansa sobre una ladera se procede a la construcción del cimiento en escalera, para favorecer su trabazón con la capa de arranque.

El núcleo constituye el grueso del relleno. Define el tramo central que marca la sección transversal de la explanada. Se encuentra entre la capa de arranque y la coronación, y su altura es variable. En función de la granulometría de los materiales empleados en su construcción se distinguen tres tipologías de rellenos: terraplenes, pedraplenes y todounos.

Si el material constituyente del núcleo es un suelo con todas sus partículas con un tamaño inferior a algo más de un decímetro hablamos de terraplén. Los pedraplenes se caracterizan por núcleo formados por fragmentos de roca dura de tamaño aproximado ligeramente inferior a un metro. Resultan más resistentes al agua que los terraplenes. Los todounos combinan suelos de granulometría muy variable en la ejecución del núcleo del relleno, desde varios decímetros hasta micras.

Los espaldones envuelven al núcleo y constituyen los taludes laterales del relleno. Tienen una misión estructural, ya que aportan consistencia a la estructura de la explanación y la protegen de los agentes meteorológicos (como la erosión ocasionada por el viento, las escorrentías de lluvias...). Estas capas también deben ser compactadas con el objetivo de evitar posibles filtraciones al núcleo del relleno. No es común ejecutar pendientes mayores de 1H-1.5V.

La capa de coronación constituye la última capa de la explanación. Se trata de las últimas tongadas del relleno por encima de la capa del núcleo y que apoyan en los espaldones. Su espesor varía entre 0,5 y 1 metros habitualmente.

Sobre la coronación del terraplén se ejecutan las capas del firme, que posibilita la circulación del tráfico rodado una vez la carretera se pone en funcionamiento. La estructura del firme de la carretera consta de tres capas: subbase, base y capa de rodadura. Su espesor varía en un rango de 0,4 a 1,5 metros. También se le conoce como la plataforma o vial, y está compuesto por los carriles, arcenes y bermas. En este proyecto no consideramos los trabajos de construcción de las capas del firme, puesto que los materiales que aquí se emplean en su mayoría proceden de préstamos o requieren trabajos de estabilización (modificación de su densidad, características mecánicas, etc.)

3.1.1 Sistemas de drenaje en carreteras

La construcción de la explanación debe permitir el correcto drenaje de la estructura, con vistas a reducir las filtraciones que se producen. Deben disponerse pendientes orientadas hacia las zanjas longitudinales o cunetas encargadas de la conducción de las aguas a los puntos de evacuación. Las cunetas se encargan de captar los flujos de agua provenientes de la plataforma y taludes, así como de los terrenos adyacentes. En función de la altura del relleno pueden construirse cunetas a diferentes alturas, tanto en la parte superior como en la zona inferior del relleno, llamándose cunetas de guarda y cuneta de pie, respectivamente. Consisten en zanjas longitudinales con forma triangular o trapezoidal, hormigonadas in-situ o construidas en base a piezas prefabricadas de hormigón, que pueden ir revestidas o no. Deberán emplearse hormigones no sulfurosos que podrán ser causa de la contaminación de las aguas captadas.

Se instalarán zanjas drenantes en puntos específicos definidos para favorecer el drenaje del relleno. Las zanjas drenantes son zanjas longitudinales cuya función es proteger las capas del firme y la explanada de posibles filtraciones laterales y que se emplean para evacuar las aguas que pudieran haber penetrado por filtración

vertical. También se construyen en situaciones en las que el nivel freático de la zona pueda tener subidas importantes. Se trata de zanjas enterradas rellenas de material drenante, constituidas por una solera de hormigón sobre la que se extiende una tubería drenante. Las tuberías drenantes son tubos de PVC perforados o ranurados a excepción de su cara inferior, están rodeadas de un filtro drenante o geotextil que permite la filtración de las aguas al interior de la tubería. Se suelen emplear áridos naturales o artificiales, gravas o piedra de cantera previamente machacada o triturada como material de relleno drenante. En cualquier caso, estos materiales estarán exentos de arcillas margas y otros materiales extraños que pudieran contaminar las aguas a cuyo drenaje se destina la zanja. Cuando se pretenda la captación de aguas freáticas, la tubería de drenaje estará perforada en todo su contorno.

En aquellas situaciones en las que el nivel freático pueda crecer significativamente, afectando a la estructura del terraplén, deberá instalarse durante las primeras etapas de la construcción un sistema de captación y evacuación de aguas subterráneas.

En los casos en los que una zanja drenante tenga desagüe directamente al exterior, sin pasar previamente por un colector, lo hará preferiblemente a un cauce. Deberá evitarse, en todo caso, la penetración de aguas de escorrentías en la zanja, por lo que deberá asegurarse su correcto aislamiento. Las aguas de escorrentías son aquellas que provienen de la plataforma de la carretera y que contiene contaminantes derivados del tráfico, como las gasolinas, aceites, caucho de los neumáticos, sales de deshielo, etcétera.

Los colectores son tuberías ciegas (sin perforar) conectadas a arquetas y pozos de registro, que recogen las aguas provenientes de los elementos de drenaje. No son elementos específicos del drenaje subterráneo de la carretera y, aunque puedan captar estas aguas, suelen recibir los flujos provenientes del drenaje superficial (normalmente muy superiores en volumen). El fondo de las arquetas y pozos deberá estar constituido por una solera que garantice su impermeabilidad.

Las láminas impermeables se emplean para aislar ciertas capas de los rellenos o terrenos naturales. Deberán colocarse con la pendiente dispuesta hacia los puntos de desagüe, y ejecutando solapes entre las láminas (la de arriba sobre la de abajo) para evitar la penetración de las aguas en la estructura del relleno.

Otro sistema comúnmente empleado son los drenes de disipación. Se construyen en situaciones en las que la base del relleno apoya sobre un perfil en ladera sobre el que se prevé un flujo de agua importante.

Los contrafuertes drenantes constituyen un sistema mixto de drenaje y refuerzo de taludes del relleno. Consta de zanjas construidas en la dirección de la pendiente del talud que aportan consistencia al conjunto. Entre estas zanjas y a diferentes alturas pueden proyectarse transversalmente otras de menor o igual profundidad, llamadas contrafuertes secundarios, que mejoran la evacuación y contribuyen también al refuerzo del paramento.

En ocasiones, y para mejorar la estabilidad y la evacuación de las aguas, se construyen gradas de disipación en distintos puntos a lo largo de la carretera. El sistema de gradas actúa como contrafuertes del paramento. Las gradas pueden ejecutarse en hormigón visto o ir revestidas con mampostería.

3.2 Consideraciones medioambientales

En las obras de caminos, los trabajos de movimiento de tierras tienen un impacto importante en el terreno existente en el tramo de intervención del proyecto, así como en las zonas de préstamos de donde se adquirirán las tierras para la construcción de la explanación. Desde la Administración se solicita para estos proyectos y en vistas a conceder la licencia de obras para el proyecto, la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental e Integración Paisajística. El Estudio de Impacto Ambiental tiene por objetivo evaluar el grado de incidencia de las obras en su entorno durante las obras y después de su puesta en funcionamiento. En este estudio se realiza la caracterización del paisaje por donde discurre la traza y, en base a ello y al tipo de actuación en la zona, se proponen una serie de medidas protectoras y correctoras de carácter medioambiental a adoptar durante las obras. El resultado del Estudio analiza la fragilidad visual de las diferentes unidades paisajísticas a lo largo del trazado, que determina la capacidad del área afectada para absorber modificaciones de carácter medioambiental en su entorno.

Las consideraciones de tipo medioambiental, por tanto, están presentes durante todo el proyecto. Desde las

primeras fases de diseño del trazado ya se tienen en cuentas las características ambientales de la zona, y se diseñará buscando el menor impacto de la construcción en su entorno y de las alteraciones temporales durante la fase de obra (estudiar soluciones al tráfico durante la ejecución de las obras).

Algunas de estas medidas adoptadas para reducir el impacto visual de los nuevos elementos en el entorno suelen ir ligadas a la revegetación de las superficies afectadas. Durante la fase de obras deberán tomarse las medidas correctoras necesarias que eviten la posible contaminación de los flujos de aguas subterráneas y superficiales y se prestará se controlarán los acopios de material.

De esta forma, el diseño del trazado de la carretera deberá asegurar que la ejecución de la explanación, es decir, el balance de volúmenes entre las zonas de desmonte y terraplenado a lo largo del eje de la carretera, pueda realizarse en su mayor parte con las tierras aprovechables de la excavación, aunque esto requiera trabajos de estabilización del material. En este sentido se busca recurrir a la extracción en préstamos en el menor de los casos, y siempre será más conveniente recurrir a préstamos y vertederos autorizados en zonas que generen un menor impacto en el entorno. En los casos en que la ejecución de los trabajos requiera el establecimiento de canteras provisionales en las inmediaciones de la obra, en la medida de lo posible se aprovecharán los huecos de la excavación en préstamos para el material sobrante de la excavación.

El diseño del trazado en vistas al aprovechamiento máximo de las tierras de la excavación deberá tener en cuenta que no se produzca grandes excavaciones o taludes de desmonte y rellenos que resulten de estos trabajos. La vía deberá adaptarse en la medida de lo posible a su entorno, de modo tenga lugar una modificación drástica del terreno afectado.

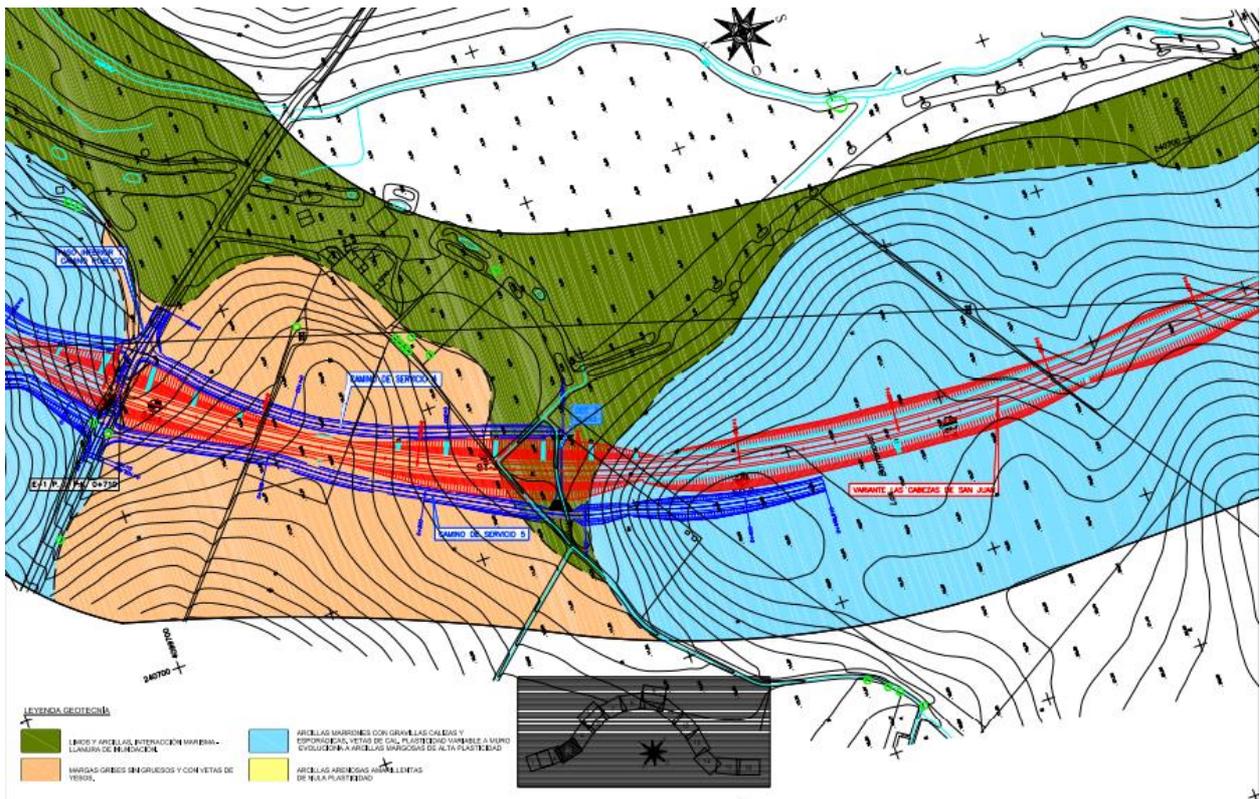


Ilustración 1 – Geotecnia del Corredor. Variante de las Cabezas

3.3 Estudio de la obra

Antes de comenzar la ejecución de los trabajos de excavación y formación de rellenos el contratista deberá aportar un programa de trabajos donde especificará, al menos, la maquinaria prevista para la realización del arranque y transporte, la organización de los equipos durante la fase de carga, los equipos de extendido y

compactación que se utilizarán, y el procedimiento de compactación que se llevará a cabo (definido en función de las especificación del proyecto en relación al espesor de tongada, número de pasadas y trabajos de humectación y/o desecación del material).

Para poder planificar la ejecución de la obra con garantías el contratista debe conocer en detalle su empresa, su solvencia económica, el personal y maquinaria disponible para su asignación al proyecto y su estructura de costes (gastos generales, costes directos e indirectos de la organización). Deberá, además, tener experiencia en la realización de proyectos de la misma índole, para analizar correctamente los condicionantes de la obra.

Sabemos que ningún proyecto es idéntico a otro. No obstante, sí pueden ser parecidos en cuanto a las operaciones, los equipos, maquinaria y materiales que se utilizan. De igual modo, la documentación necesaria y los trámites legales antes y durante la ejecución de las obras también es similar.

Conocer el sector, por lo tanto, permite conocer de primera mano los costes y sobrecostes asociados a la obra. En cuanto a la ejecución de las operaciones de movimiento de tierras en una obra de caminos, este número viene condicionado por la naturaleza de los trabajos (explanación, vaciado, etc.), los materiales de excavación presentes en la traza y la geometría del terreno.

3.3.1 Planificación de las operaciones de movimiento de tierras

Ningún proyecto es igual a otro. Cambia el promotor del proyecto, el emplazamiento de la obra, los equipos, la relación con la administración, los proveedores, etc. Las empresas constructoras, por lo tanto, desarrollan su actividad en entornos cambiantes, debiendo trasladar sus recursos al lugar donde se desarrollará la obra y, para cada proyecto, la empresa produce un producto único. Si los trabajos se desarrollan según la planificación elaborada, el proyecto terminará dentro del plazo, se reducirán los sobrecostes incurridos y obtendremos el beneficio esperado.

La labor de planificación de la obra es fundamental en este caso. No se puede improvisar, ya que esto llevará a emplear procedimientos de trabajo completamente antieconómicos para el contratista de la obra. El trabajo de asignación de equipos de trabajo a la obra no es sencillo. En las obras de construcción los equipos no trabajan como entidades independientes, sino que lo hacen de manera conjunta, pues todos los trabajos están interrelacionados. A la hora de plantearnos qué equipos y métodos de excavación utilizaremos debemos tener en cuenta esto. De nada sirve emplear una excavadora hidráulica de gran magnitud en la excavación si luego dimensionamos una flota de dúmperes insuficiente para igualar la producción de la excavadora. De igual modo, para las operaciones de nivelación y extendido, necesitaremos tantos equipos como sean necesarios para absorber la producción de los camiones.

No hay una única combinación de equipos admisible para ejecutar la obra, pero sí existe una que optimiza el avance de los trabajos en tiempo y coste. Es trabajo del constructor seleccionar los equipos que aseguren la realización del proyecto dentro de los márgenes especificados.

El análisis parte de un estudio de las producciones alcanzables para cada combinación de equipos. Es importante para ello conocer las características técnicas de los equipos, como las velocidades alcanzables en carga y vacío, su capacidad, los tiempos fijos por maniobras, etcétera. La experiencia en otras obras es importante, ya que permite conocer de primera mano el desempeño de los equipos en campo. No obstante, y como ya hemos mencionado, las condiciones existentes varían en cada obra, y deberemos tenerlas en cuenta al realizar el estudio. Otros factores como la capacidad de suministro de la maquinaria, la inversión requerida o la falta de personal cualificado para su operación pueden condicionar la selección de los equipos.

La combinación de equipos que genere rendimientos mayores permitirá completar el proyecto en menor tiempo. Pero ¿supone este ahorro en tiempo un ahorro en coste? Si la respuesta es afirmativa la decisión es clara. Sabemos que una menor duración del proyecto supone, por lo general, beneficios al constructor, ya que se reducen los pagos por alquiler de la maquinaria y las nóminas de los trabajadores, que constituyen la partida de gastos principal.

La aplicación de técnicas de programación lineal durante la etapa de estudio de la obra está creciendo en los últimos años. Los modelos, que se desarrollan con vistas a reducir los costes de los trabajos, consideran una gran cantidad de datos asociados al proyecto y proporcionan soluciones a la planificación de la ejecución de los trabajos.

El Modelo que se presenta en este Trabajo, y que más adelante explicaremos, tiene como principal objetivo aportar una ventaja competitiva al constructor que opta por utilizar esta herramienta frente a aquellos únicamente se basan en los métodos tradicionales de planificación.

3.3.2 Naturaleza de los trabajos

Se relaciona con el tipo de movimiento de tierras que se ha de realizar. Los trabajos de MdT hacen referencia a aquellas actuaciones realizadas sobre el terreno con el fin de dejarlo libre de elementos que no son deseables para acometer la construcción de la explanación y modificar su geometría.

En función de su naturaleza los trabajos se clasifican en explanaciones, vaciados, zanjas y pozos, perforaciones, galerías y túneles, y rellenos.

Las explanaciones son actuaciones a cielo abierto que afectan a una superficie relativamente amplia. La modificación del relieve ocurre como consecuencia de la compensación de volúmenes que se realiza desde la sección en excavación o desmonte a la sección en terraplenado o relleno. En su sentido más amplio, las explanaciones abarcan las operaciones de desmonte y relleno que es preciso realizar sobre el terreno natural para obtener la geometría deseada.

La ejecución de vaciados es común en proyectos de edificación, en la construcción de sótanos y plantas bajo rasante. Se trata de movimientos de tierras de excavación que afectan, por lo general, a toda la planta de un edificio. Los taludes del vaciado se dejan rectos. El procedimiento de actuación consiste en asegurar las paredes del sótano mediante la ejecución de muros pantalla que, en función de las presiones de empuje del terreno, podrán ir asegurados mediante tirantes de acero anclados al terreno, y posteriormente acometer el vaciado. La cuchara bivalva hidráulica es el equipo de obra especializado en la excavación de muros pantallas en edificios.

La construcción de zanjas constituye un trabajo de obra lineal a lo largo del trazado definido para la zanja. Se trata de trabajos de excavación en los que la dimensión longitudinal domina sobre la transversal. En función de su dimensión se suelen emplear excavadoras mecánicas de mayor o menor tamaño. Las zanjas se realizan en edificación y obra civil para alojar las conducciones eléctricas, de teléfono, datos, tuberías de gas, agua... Una vez realizado el tendido de las instalaciones se procede al relleno y compactación de la zanja con material adecuado para ello. Los pozos se construyen para el establecimiento de registros en el paso de instalaciones.

Las perforaciones consisten en excavaciones de pequeño diámetro. En la industria de la construcción se realizan cuando el cálculo de la cimentación solicita la ejecución de pilotes o micropilotes para asegurar el anclaje del edificio al terreno.

Las galerías y túneles son operaciones subterráneas de movimiento de tierras (MdT). Se ejecución requiere el empleo de maquinaria de excavación especializada, como las tuneladoras o topos.

La ejecución de explanaciones implica la realización de rellenos en los tramos de la obra en los que la rasante del proyecto se encuentra por encima de la cota del terreno natural.

3.3.3 Clasificación de suelos

La tipología de los suelos condiciona los métodos y equipos de excavación y transporte que se utilizarán en la obra. También influye en el diseño y la composición de las capas que constituyen el relleno.

Generalmente se distingue entre suelos orgánicos e inorgánicos, suelos granulares y suelos de grano fino. La distinción entre suelos orgánicos e inorgánicos hace referencia a su contenido en materia orgánica. Estos suelos con presencia de raíces, ramas y materia vegetal de cualquier tipo, por lo general, no son adecuados para su empleo como material de relleno en la ejecución de explanaciones. Los suelos orgánicos se caracterizan por tener menor resistencia y rigidez que los suelos granulares, consecuencia del proceso de descomposición que sufren. Por esta razón, la capa superficial de tierra vegetal suele extraerse antes de comenzar los trabajos de excavación. En situaciones donde la altura del terraplén supere en cinco veces el espesor de la capa de tierra vegetal, o en terrenos fangosos, donde la presencia de tierra vegetal, por la cohesión que aportan las raíces, favorezca la construcción del cimientado del relleno, puede desestimarse el desbroce y retirada de las tierras.

Los suelos granulares hacen referencia a terrenos constituidos por gravas, arenas o mezcla de ambos. No son

cohesivos, debido a su bajo contenido en finos, y se catalogan como bien o mal graduados en función sus propiedades.

En vistas a realizar el análisis granulométrico de un determinado suelo, es importante conocer el concepto de tamizado. La operación de tamizado consiste en hacer pasar una muestra de suelo por un tamiz de un diámetro determinado y refleja, en función de la fracción de material que pasa o queda retenido en él, la tipología y características granulométricas del material. Como ya mencionamos, los suelos son una mezcla de partículas de diferentes tamaños, distinguiendo, de mayor a menor diámetro, entre piedras, gravas, arenas, limos y arcillas. El tamiz nº4, que permite el paso de aquellas partículas de diámetro inferior a 4,75mm, establece el límite en que una partícula se define como grava o piedra (cuando su tamaño es superior a 3 pulgadas); el tamiz nº200 retiene aquellas partículas que, habiendo pasado el tamiz nº4, tienen un tamaño superior a 75µm (micras). La fracción retenida se define como arenas, mientras que las partículas que pasan por el tamiz se denominan “fracción fina”.

Los suelos de grano fino, por lo tanto, están constituidos por un agregado de partículas incluidas dentro del rango de la fracción fina, es decir, partículas que pasan por el tamiz nº200. Sus propiedades dependen de la proporción de finos presentes en el suelo, su composición mineralógica y la cantidad de agua existente. El tipo de fracción fina se determina mediante el estudio de los Límites de Atterberg y el Diagrama de plasticidad de Casagrande. Ambos análisis aportan claridad acerca de la consistencia y plasticidad de los suelos de grano fino.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el más extendido y utilizado en geotecnia en la actualidad, nos permite realizar un estudio más detallado de los diferentes tipos de suelos. Establece un método en base a una serie de tablas mediante las cuales se define la tipología de las partículas que componen un determinado suelo, profundizando en la catalogación de las gravas, arenas y limos (gruesos, medios o finos) según sea el caso. Para ello hace uso de una serie de parámetros granulométricos (valores representativos de la fracción que pasa por los tamices nº4 y nº200, coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de graduación (C_c)) y plásticos (I_p y w_L). La simbología que establece es la siguiente: gravas (G), arenas (S), limo (M), arcilla (C), orgánico (O) y turba (Pt, suelos muy orgánicos).

3.3.3.1 Cambios en los volúmenes de trabajo

Durante las operaciones de movimiento de tierras el terreno sufre cambios en la disposición de sus partículas que provocan variaciones en el volumen que ocupan las tierras en cada momento. Así, se habla en términos de volumen de tierras en banco (m3B) para la cubicación del volumen de material de desmonte antes de proceder a su excavación; se emplea la unidad de volumen esponjado (m3E) para las tierras ya excavadas; y se habla de metros cúbicos de volumen compactado (m3C) para referirse las necesidades de material en terraplenado. En proyectos de obras lineales las partidas se valoran en una unidad concreta para cada caso. Así, las operaciones de arranque se valoran en m3B de tierras excavadas, el transporte de tierras se expresa en m3E de tierras acarreadas y las operaciones de compactación en m3C de tierras compactadas. La densidad de las tierras, la humedad del terreno o el tamaño de las partículas juegan un papel importante en las variaciones de volumen que se producen.

Cuando se presupuesta un proyecto de una obra de carreteras no deben pasarse por alto estos cambios en el volumen, por su implicación económica. Las variaciones en el volumen pueden condicionar el balance de las tierras de la excavación disponibles para la ejecución de rellenos y es, por tanto, fundamental tenerlo en cuenta para poder comprender y planificar correctamente la obra.

3.4 Representación del proyecto

La representación visual del proyecto aporta información al constructor de la obra acerca de las actuaciones que será necesario llevar a cabo en la obra. Una obra lineal no puede entenderse sin una memoria de ejecución en la que se describa la obra en su totalidad y un conjunto de planos de planta y planos de alzado del trazado. Este archivo de planos del proyecto está formado por los planos de vista en planta, el perfil longitudinal y las secciones transversales a lo largo de la explanación.

3.4.1 Planos de Planta

La vista en planta representa el trazado final de la carretera respecto a su entorno. Incorpora información relevante en cuanto a las cotas globales de proyecto, el recorrido de zanjas, la ubicación de colectores y pasos inferiores, interferencias con otros servicios existentes, etcétera.

Se emplea en el estudio de la situación de los puntos de acceso a la obra, para los que se tratarán de aprovechar otras infraestructuras ya existentes; también en la identificación de posibles conflictos por interferencias con otros viales o instalaciones de servicios o redes de distribución ya existentes. En estos casos, deberán reponerse, a cargo del promotor, los servicios afectados, siendo la compañía distribuidora la que ejecutará los trabajos.

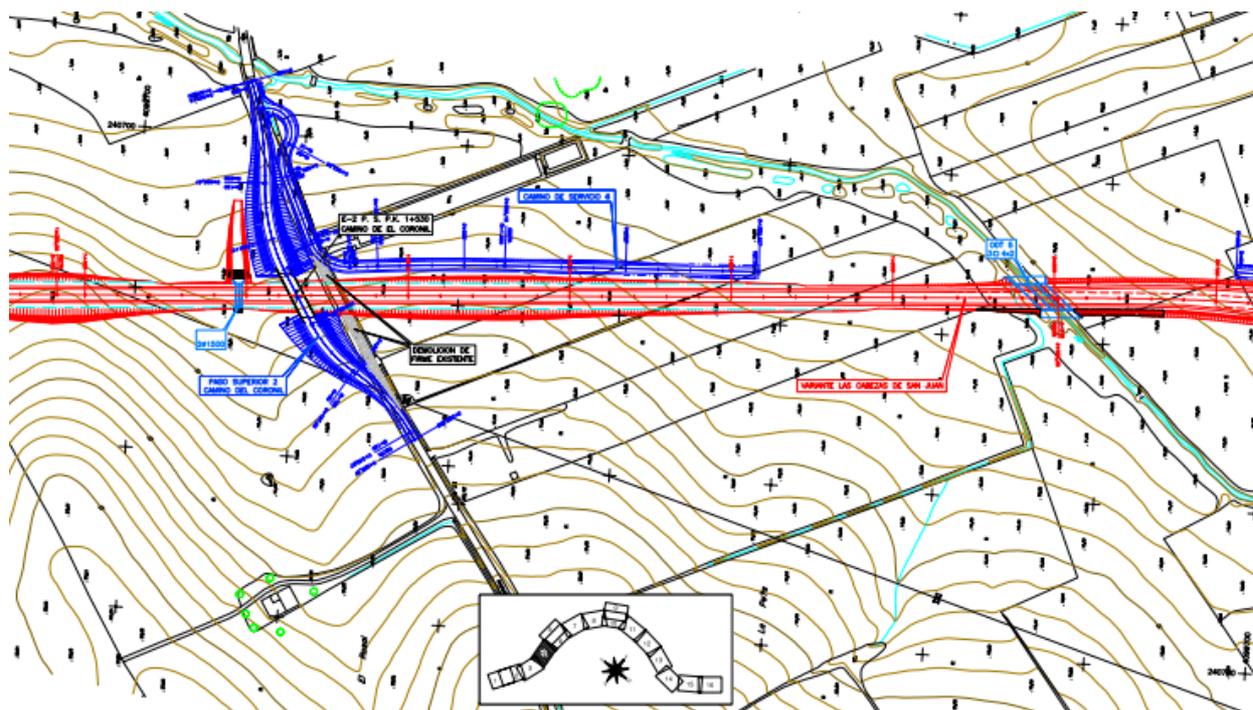


Ilustración 2 – Vista en Planta. Variante de las Cabezas

3.4.1.1 Modelos digitales del terreno

El emplazamiento de la obra es importante a la hora de conocer las características del terreno y ambientales en la zona: temperaturas máximas y mínimas, aparición de heladas, vientos que puedan provocar levantamiento de polvos o una previsión de las precipitaciones anuales. Esto deberá tenerse en cuenta a la hora de estimar los tiempos de ejecución de los trabajos, prever una bolsa de contingencias y poder adoptar las medidas oportunas en cuanto a sistemas y medidas de protección tanto para la zona de trabajo como para los trabajadores, que contribuyan a reducir los problemas derivados de estas situaciones.

Con esto en mente, se han desarrollado sistemas que ayudan a comprender mejor el lugar donde se desarrollarán los trabajos, con vistas a reducir el riesgo asumido por las personas que participan en el proyecto

El Modelo Digital del Terreno (MDT) es el resultado de aplicar esta filosofía. Los modelos digitales del terreno consisten en una representación tridimensional de terreno por donde discurre el trazado de la carretera. Mediante una estructura cuadrangular o en base a triángulos se consigue modelar de forma precisa el terreno natural existente antes de la actuación. La agrupación de triángulos de menor tamaño representa zonas donde la pendiente del terreno es más abrupta, mientras que triángulos más grandes definen zonas planas o de menor pendiente. Funciona de manera similar a las líneas de nivel que habitualmente se dibujan en los planos y que permiten conocer las pendientes existentes en una parcela de la parcela.

3.4.2 El Perfil Longitudinal del Terreno

El perfil longitudinal de terreno permite obtener a simple vista una idea generalizada de la obra. Representa la sección longitudinal de la rasante (eje del trazado) a lo largo del trazado de la carretera. Contiene información de las cotas del terreno existente y de las cotas finales de la explanación. De esta forma, podemos diferenciar rápidamente entre perfiles transversales en desmonte, cuando la línea del terreno natural está por encima de la línea de la rasante y perfiles transversales en relleno, cuando la rasante se encuentra por encima.

La información aparece contenida en un gráfico que muestra la cota del terreno a lo largo del trazado respecto de la rasante. En el eje de abscisas se define el recorrido de la carretera por sus cotas topográficas (p.k.) y en el eje de ordenadas altura del terreno respecto a un plano horizontal que se toma de referencia. Incluye un conjunto de filas donde se incluyen las distancias parciales entre secciones, que suele estar comprendidas entre 20 y 30 metros de distancia, la cota roja de desmonte en cada sección transversal, la cota roja de terraplén y el recorrido de la curva que dibuja el trazado. De esta forma, conociendo los perfiles del terreno en cada tramo del trazado podemos calcular los volúmenes de trabajo disponibles o necesarios en cada caso. Actualmente estos cálculos se realizan rápidamente mediante el empleo de herramientas informáticas con aplicación en ingeniería civil.

El perfil longitudinal es una herramienta fundamental en los proyectos de carreteras. Como ya hemos dicho, permite conocer el relieve del terreno a lo largo del trazado y permite realizar el cálculo de volúmenes en la traza mediante un cálculo de áreas.

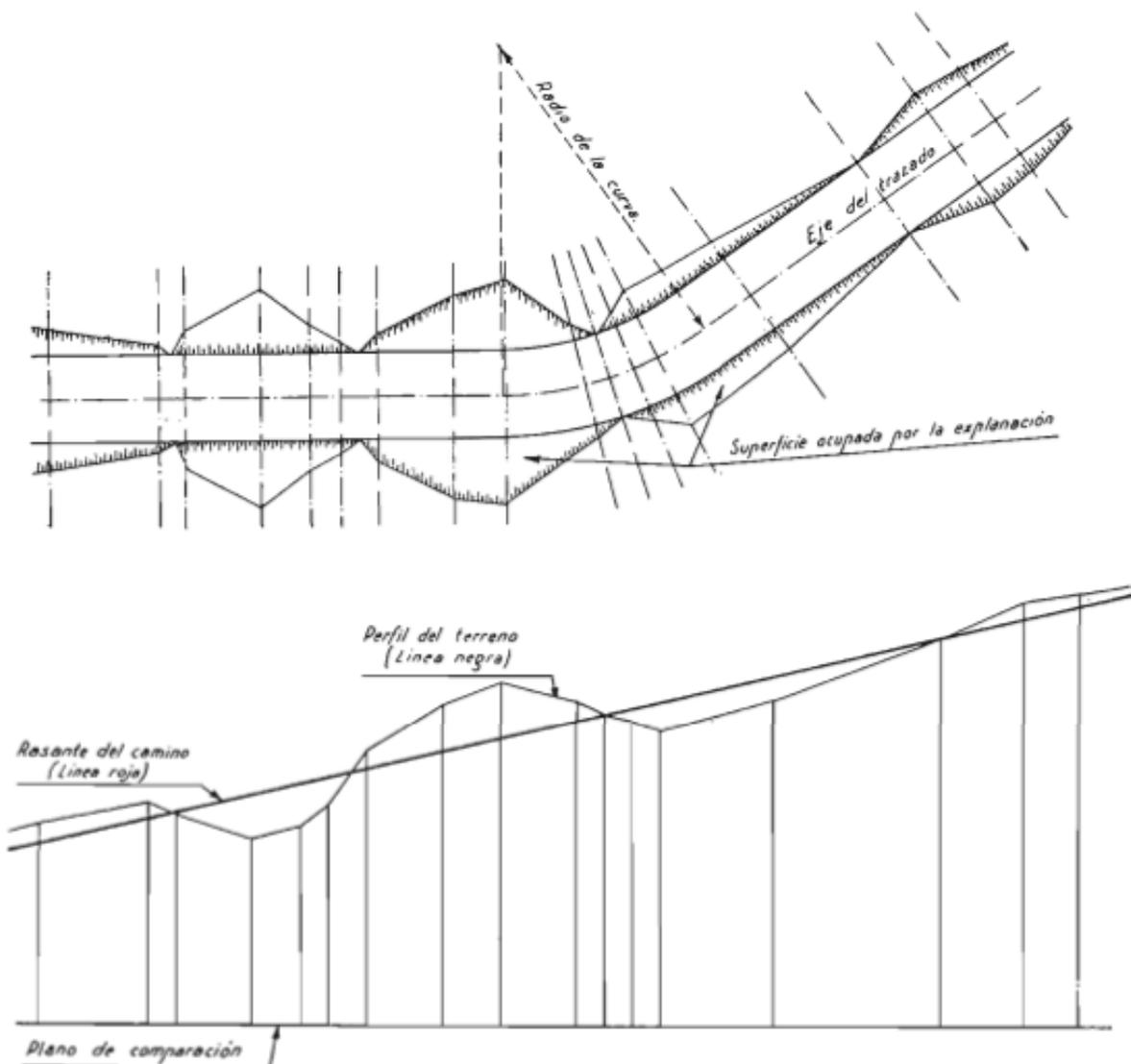


Ilustración 3 – Vista en Perfil de un trazado

3.4.3 Perfiles Transversales

Las secciones o perfiles transversales que se establecen en diferentes puntos de la explanación constituyen una herramienta fundamental de apoyo a la construcción para el contratista encargado de la ejecución de los trabajos, ya que incluye información detallada de los detalles constructivos en la sección. Presenta la geometría del desmonte o el terraplén requeridos en un punto concreto del trazado, define la cota del terreno natural, el espesor de las capas que constituyen el relleno, las pendientes de los taludes, los encuentros con arquetas, pozos y otros sistemas de drenaje, etcétera.

En función de la posición de la cota del terreno natural respecto a la rasante de la carretera diferenciamos entre perfiles transversales en desmonte, relleno y perfiles a media ladera, que requieren la realización de trabajos de excavación y de relleno en el mismo tramo.

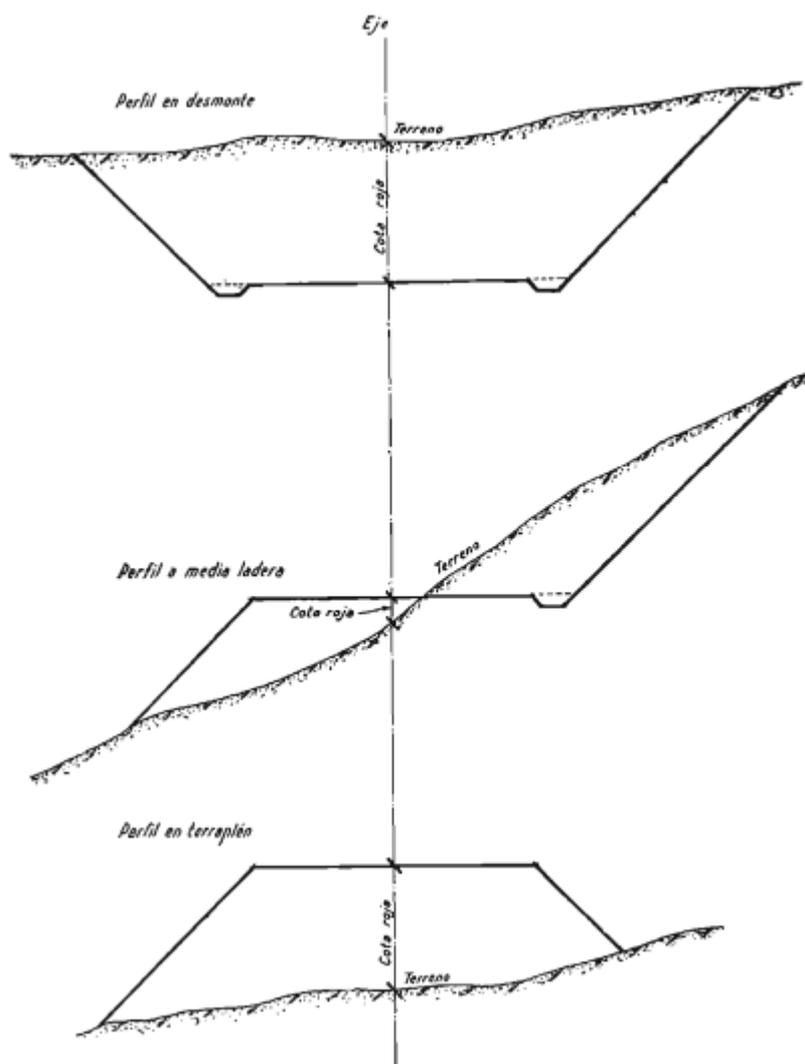


Ilustración 4 – Perfiles transversales en obras de caminos

3.5 Ejecución de las obras

Durante la ejecución de los trabajos en una obra lineal de caminos el proyecto pasa por diferentes fases. Estas fases son tres: los trabajos preliminares de obra, la ejecución de la explanación y la construcción del firme de la carretera. Los trabajos preliminares preparan la zona de trabajo antes de dar comienzo a los trabajos de explanación del terreno; la ejecución de la explanación engloba la realización de los trabajos habituales de

movimiento de tierras, esto es, las operaciones de excavación, carga, transporte y extendido y compactación de las tierras, que comentaremos más adelante; en la fase de terminación de la capa de firme de la carretera, intervienen equipos especializados y se emplean materiales asfálticos traídos a la obra.

Si bien el grueso del presupuesto de la obra se encuentra en las dos últimas fases de la obra todas deben considerarse de igual forma, ya que están entrelazadas. Un retraso excesivo en la primera fase puede implicar un incremento de los costes asociados a los trabajos posteriores y hacer que la realización del proyecto no sea rentable.

La elección de los equipos que se emplearán en la obra es compleja. De la experiencia podemos hacernos una idea de la conveniencia de emplear unos u otros, pero el resultado final dependerá tanto de las características de excavación del terreno existente como de las distancias de transporte en la obra. La decisión que tomemos en relación a la maquinaria que utilizaremos durante la ejecución influirá en el desarrollo de la obra y, por lo tanto, condicionará la duración y coste final de los trabajos.

Las operaciones de movimiento de tierras en la industria de la construcción no constituyen por lo general una partida clave. Aquí es donde radica la diferencia fundamental con los proyectos de obras de caminos, donde estas partidas representan una parte muy importante del presupuesto final de la obra. De ahí la importancia de conocer bien el proyecto de la obra y realizar una planificación acorde a las exigencias de los trabajos.

Durante la ejecución de una obra de carreteras, el contratista deberá velar por la buena ejecución de los trabajos, manteniendo la obra en perfectas condiciones de organización y limpieza.

A continuación, explicamos en qué consisten los trabajos previos que debemos realizar antes de comenzar la compensación de volúmenes en la traza, las operaciones básicas que caracterizan la ejecución de explanaciones y los equipos de trabajo que se utilizan.

3.5.1 Trabajos previos

Los trabajos preliminares son el conjunto de operaciones previas que es necesario ejecutar para dar comienzo a las obras de explanación. Una vez aprobado el proyecto de ejecución de la obra y obtenidas las licencias necesarias para comenzar las obras, los trabajos preliminares que engloban la construcción de los accesos a la obra, la retirada de servicios existentes, el desbroce y limpieza del terreno, y la ejecución de las obras de desagüe transversal (ODT).

3.5.1.1 Accesos a la obra

El punto inicial en la planificación de la obra es la ubicación de los puntos de acceso a la traza, fundamental para que tanto equipos como personas puedan acceder al lugar de trabajo. El estudio de la posición y construcción de las pistas de acceso a la obra requiere conocer bien el entorno de la obra. Cuando exista una carretera en las inmediaciones de la obra, ésta pasará a ser el eje del que partan los accesos. Los trabajos de construcción de las vías de acceso pueden tener una repercusión importante en los costes iniciales de proyecto, de modo que, en la medida de lo posible, se utilizarán caminos ya existentes.

Deberemos solicitar a la administración competente el permiso de apertura de estos puntos de acceso a la obra. En algunos casos, la administración puede solicitar el refuerzo del firme de la carretera en esos puntos y, con carácter obligatorio, deberá adecuarse la señalización en la zona durante el tiempo que duren las obras.

Es conveniente tener bien estudiada y justificada la idoneidad de establecer las pistas de acceso a la obra, para que su aprobación no retrase el comienzo de los trabajos.

3.5.1.2 Retirada de los servicios existentes

Con carácter general, el inicio de una obra lineal de caminos viene precedido de una serie de trabajos que engloban la retirada de los servicios existentes, los trabajos de adecuación del terreno en la zona donde se ubicarán las casetas de obra de los trabajadores y la ejecución de las instalaciones provisionales de luz y agua.

Las obras de construcción de carreteras transcurren a lo largo de varios kilómetros y es común que surjan conflictos con otros servicios o estructuras presentes en la zona (cruces con otras vías, servicios generales de

abastecimiento de agua, redes de saneamiento, tendidos eléctricos, líneas telefónicas, gaseoductos, oleoductos, etcétera). En la planificación de los trabajos debe tenerse en cuenta la afectación de otras vías en servicio, garantizando en la medida de lo posible su funcionamiento normal durante la obra.

En el caso de retirada de servicios ya establecidos el constructor se hará cargo de su coste de retirada y reubicación, además del coste de reimplantación del servicio. No obstante, es habitual que las compañías suministradoras sean las encargadas de realizar estos trabajos.

3.5.1.3 Despeje y desbroce

La operación de despeje consiste en la eliminación de los obstáculos que pudieran entorpecer la realización de los trabajos de movimiento de tierras. Estos obstáculos pueden ser: edificaciones y estructuras de cualquier tipo, que deberán ser demolidas, retiradas o reubicadas en cada caso. También el arbolado de tamaño superior a cierto diámetro supone obstáculos que repercuten de manera directa en la ejecución de los trabajos. En cualquier caso, es necesario contar con permisos de demolición y tala de árboles antes de acometer la actuación.

El desbroce del terreno consiste en la retirada de la cubierta vegetal del terreno, hasta una profundidad algo por encima a la alcanzada por las raíces. Estas tierras debido a su alto contenido en materia orgánica no son adecuadas para su empleo como material de relleno. También se retiran otros materiales desechables como escombros o basura de cualquier tipo. Excepcionalmente, puede no retirarse

En la situación actual, es muy importante la elaboración de un plan de reposición ambiental que considere la reforestación y restauración del terreno afectado por las obras a las condiciones en que se encontraba antes de la actuación. Por este motivo, la tierra vegetal extraída en ocasiones se acopia para su posterior utilización en taludes u otras zonas a lo largo del trazado. El abono de las partidas de desbroce puede hacerse por separado o estar incluido en la unidad de excavación de las tierras.

3.5.1.4 Obras de drenaje transversal

La construcción de las obras de desagüe transversal (ODT) debe realizarse con carácter previo a la ejecución de la explanación. El objetivo de estas obras es la correcta canalización de los cauces que atraviesan la obra, permitiendo su paso sin afectar a la estructura del relleno. Las ODT quedarán por debajo de la cota del cimiento de la explanación y deberá retrasarse el tránsito de maquinaria pesada hasta que no se haya dispuesto una primera capa de relleno que proteja la canalización.

Las obras de drenaje transversal junto con las estructuras existentes en el trazado constituyen un condicionante importante durante la realización de los trabajos de MdT, ya que obligan a dibujar curvas y pendientes en las pistas de acarreo, desvirtuando las distancias teóricas de acarreo dentro de la obra. Aunque normalmente el contratista subcontrata la ejecución del movimiento de tierras a una empresa especializada, las obras de drenaje son ejecutadas por él, lo que requiere una buena planificación y comunicación entre ambos.

Debemos tener cuidado en este punto, pues una mala ejecución de las ODT puede producir fugas que a larga afecten a la estabilidad del paramento de la explanación. Si, por cualquier razón, estas deficiencias fueran responsabilidad de una mala ejecución el contratista deberá asumir por cuenta propia los costes de reparación. Si el problema resultara de un mal diseño del proyecto, el promotor deberá abonar al contratista el coste asociado a la reconstrucción del relleno en la zona afectada.



Ilustración 5 – Representación de una obra de drenaje transversal en carreteras

3.5.2 Operaciones de movimiento de tierras

Las operaciones de movimiento de tierras constituyen uno de los paquetes más importantes en la obra de caminos. La ejecución de estos trabajos abarca la mayor parte de las obras y, por lo tanto, tiene un impacto significativo en el coste final del proyecto. Otros paquetes destacados del presupuesto abarcan la construcción de estructuras, pasos a nivel, enlaces entre viales, y la constitución del firme de la carretera.

El objetivo fundamental del estudio de las operaciones de MdT es la construcción de la explanación de la carretera. Las operaciones de MdT son diferentes entre sí, pero se ejecutan como una cadena de producción en la que todas dependen las unas de las otras. Una buena organización de la obra, donde las pistas estén bien construidas y las zonas de actuación de los equipos se definan correctamente, favorecerá el buen avance de los trabajos, permitiendo que los equipos de obra realicen su actividad en condiciones adecuadas para ello.

Las operaciones de movimiento de tierras agrupan los trabajos de excavación, carga, transporte, descarga, nivelación y extendido, compactación y refinado. La partida de trabajos más importante consiste en la ejecución de la excavación y transporte de material desde las zonas de excavación a las de relleno, los acarreos a zonas de vertedero de sobrantes y la adquisición y transporte de tierras de préstamos. A la hora de planificar los trabajos es importante conocer la ubicación de los puntos de vertido y préstamos existentes en las cercanías de la obra, ya que las cubicaciones de material que proceden o se destinan a estos lugares suelen ser importantes y repercuten de forma significativa en el coste de la obra. Conocer las características de los materiales presentes en la traza es fundamental para conocer el volumen de material de excavación aprovechable y si será necesario o no traer tierras de préstamos para realizar la compensación de volúmenes en la traza.

Como norma general, en obras lineales de caminos, al igual que en edificación y obra civil, los contratistas suelen subcontratar los trabajos de movimiento de tierras a empresas especialistas. La diferencia radica en que, en los proyectos de construcción de carreteras, al contrario que los proyectos de edificación en los que la maquinaria específica de movimiento de tierras está presente en la obra durante los trabajos de vaciado y excavación durante la cimentación, los equipos de MdT están presentes a lo largo de todo el proyecto.

A continuación, se explican las operaciones de MdT en obra lineales de caminos.

3.5.2.1 Excavación

En una obra lineal, como ya hemos dicho, los equipos trabajan como una planta de producción en la que todas las operaciones son dependientes entre ellas. El inicio de las obras, una vez realizados los tajos preliminares de demolición y desbroce del terreno, lo marca el comienzo de los trabajos de excavación, que deberán ajustarse a las alineaciones, pendientes, dimensiones y demás información contenida en el proyecto. Se trata del primer eslabón de la cadena y es el que marcará el ritmo de producción en la obra.

Estudiar el informe geotécnico del terreno, elaborado por un técnico especializado, donde se incluye información relevante a cerca de los tipos y características de los suelos presentes en la obra, su ubicación en la zona de actuación y la cota a la que se encuentran, proporciona una gran ventaja al constructor a la hora de definir los equipos mecánicos más adecuados para realizar la excavación. Un error de selección puede conducir a escenarios en obra complicados, con equipos improductivos y, en consecuencia, caros para el contratista. Si esto ocurriese, el contratista deberá tomar las decisiones y proponer los cambios necesarios al promotor en cuanto a los equipos que empleará para reconducir el avance de la obra.

Este Trabajo pretende ayudar al constructor de la obra a definir un buen plan de obras para evitar caer en estos errores.

Los trabajos de excavación consisten en el arranque, mediante el empleo de equipos mecánicos, de las tierras en desmonte para su posterior transporte a otras zonas de la obra. Se incluye aquí también la excavación en zonas de préstamos. Durante los trabajos de excavación se tomarán las precauciones necesarias con vistas a alterar en el menor grado posible las características del entorno, y asegurar la estabilidad y resistencia del terreno existente tras la excavación.

Se distinguen los siguientes tipos de excavaciones en función de la naturaleza de los materiales presentes en el terreno y los métodos que se utilizan: excavación en roca, excavación en terreno de tránsito y excavación en tierras.

La excavación en roca comprende aquellos materiales con características de roca masiva, depósitos estratificados o fuertemente cementados, que requieren del empleo de explosivos para excavarlos.

La excavación en terrenos de tránsito se da en aquellas situaciones en las que los suelos están formados por agregados de rocas descompuestas, tierras muy compactadas y todos aquellos suelos para los que, no siendo necesario el uso de explosivos, sí que requieren de un escarificado previo para proceder a su excavación.

La excavación en tierras incluye los trabajos en terrenos cuyos materiales constituyentes no se incluyen en los casos anteriores.

En función de las propiedades del terreno excavado, éste puede o no resultar adecuado para su empleo como material de relleno en terraplenes. En caso de que el material excavado no garantice los requerimientos técnicos necesarios se procede a su transporte a vertederos.

El volumen de tierra vegetal que se encuentre en las excavaciones porque no hubiera sido extraído previamente durante el desbroce se removerá para su acopio y empleo posterior en otras zonas de la obra.

Las partidas de excavación se miden en metros cúbicos en banco (m3B) de material en perfil. El coste de la partida (€/m3B) dependerá del coste de los equipos utilizados, sus rendimientos y la tipología del suelo excavado.

La maquinaria de excavación habitualmente empleada en obras lineales consiste en retroexcavadoras, tractores sobre orugas o buldóceres y mototraíllas. En puntos posteriores hablaremos de los equipos de trabajo en la obra.

3.5.2.2 Carga

Una vez arrancadas del terreno, las tierras se cargan en los equipos que las transportarán al punto de destino. El procedimiento de carga varía en función de los equipos de excavación empleados.

Las excavadoras hidráulicas realizan la carga de las tierras en los equipos a la vez que las excavan. La máquina arranca las tierras y procede a su carga en el equipo de acarreo seleccionado (dúmperes o camiones bañera), que esperará a que la caja del camión haya sido llenada para partir. Es importante estudiar la disposición de los equipos de transporte respecto de la maquinaria de excavación, para facilitar el proceso de carga. De esta manera podremos reducir los tiempos de maniobras y giros que deberá realizar la retroexcavadora durante el proceso.

Es importante conocer bien las características técnicas de los equipos de trabajo que se emplearán en las operaciones de excavación, carga y transporte. De esta forma, podremos definir correctamente el número de equipos de transporte necesarios para trabajar en cadena con los equipos de carga. Esto es muy importante ya que, si nos equivocamos en el cálculo podríamos estar empleando más o menos equipos de los necesarios para igualar el ritmo de excavación de las máquinas. Si nos quedamos cortos en la selección de los equipos de transporte, la maquinaria de carga no trabajará a máximo rendimiento, se producirán paradas, y retrasaremos el

avance de la obra. Si empleamos una flota de equipos mayor, tendremos equipos esperando a que puedan ser cargados, y esto nos costará dinero. Así es importante establecer pautas de actuación concretas, como que el maquinista conozca el número de cucharas necesarias para asegurar el llenado de la caja de los camiones.

Otros equipos, como los tractores, especializados en el arranque y extendido de las tierras, trabajan en paralelo con equipos especializados en la carga de tierras, como las palas cargadoras. Las palas cargadoras generan rendimientos altos en el proceso de carga de materiales. No son eficientes, por el contrario, a la hora de realizar trabajos de arranque y transporte, aunque podrían emplearse en aquellos casos en que las características del terreno lo permitan y la distancia de acarreo no supere cierta distancia (por encima de 100 metros no son rentables).

El coste asociado a la operación de carga de material se valora en el presupuesto de manera diferente en función del procedimiento de trabajo en la obra. Si el arranque de material lo realizan mototraíllas, en la partida de excavación se incluye también la carga y el transporte de las tierras, medida en metros cúbicos de tierras esponjadas (m³E). Cuando la excavación se realiza con excavadoras, el coste de la carga de las tierras se repercute en el precio final de la partida de excavación. Cuando se utilizan palas cargadoras para la carga en los equipos, se incluye una partida específica de carga de material (m³E) con pala cargadora.

3.5.2.3 Transporte

La operación de transporte en obras de caminos consiste en el movimiento de materiales desde un punto de origen (excavación) a un punto de destino (terraplenado). Es la operación posterior a la carga de las tierras y la que tiene mayor repercusión en los costes de la obra.

El movimiento de materiales en obra se realiza desde los perfiles en excavación a los perfiles en relleno, o a puntos autorizados de vertido. También se incluye aquí el transporte a obra de las tierras procedentes de préstamos. La condición en que se encuentran las pistas de circulación dentro de la obra y los accesos a la misma repercutirá directamente en estos trabajos. La propia circulación de la maquinaria suele asegurar una buena compactación de las pistas, pero deberán revisarse las zonas donde pudiera haber problemas en el desagüe de los flujos de lluvia, siendo necesario de forma ocasional el extendido de zahorras para mejorar el terreno.

La distancia es el factor principal que repercute en el coste del transporte de materiales (€/m³E). A mayor distancia, mayor será el tiempo invertido en el transporte, el consumo de combustible será también mayor y los rendimientos serán menores. Por este motivo es importante, antes de comenzar la obra, estudiar la ubicación de los préstamos y vertederos en la zona y conocer el canon de adquisición y vertido por tipo de material. Por lo general, siempre será más rentable económicamente el que se encuentre a menor distancia de la obra.

La planificación de los trabajos y selección de los equipos de transporte apropiados parte del estudio del Diagrama de Masas y de las condiciones de excavación del terreno. La elección final del modelo de maquinaria dependerá de sus características técnicas (velocidad, capacidad de carga, consumo, mantenimientos requeridos, etc.) y producciones alcanzables.

Las partidas de transporte de material se suelen incluir en la partida de excavación, aunque el transporte de material a vertedero se defina en una partida a parte. Es importante conocer las características de los materiales presentes en la obra en cuanto a su densidad y esponjamiento, que acotarán los valores de carga admisibles por los equipos.

3.5.2.4 Descarga

Una vez el equipo de transporte ha completado el trayecto, procede a la descarga de las tierras. Una vez hecho esto volverá al punto de inicio del recorrido, o a una nueva ubicación en el trazado. La descarga de material se realizará siguiendo las indicaciones del personal encargado en la ejecución de la explanación, de manera que no interfiera con el movimiento o el trabajo de otros equipos de obra.

Los camiones y dúmperes realizan la descarga elevando la caja mediante un pistón hidráulico. La caja del camión presenta una trampilla por donde descargan las tierras. A medida que se produce la descarga de las tierras, el conductor mueve el camión para permitir la descarga completa del material.

Equipos como los buldóceres y la mototraíllas realizan un primer extendido de las tierras durante la descarga, lo que favorece los trabajos posteriores de nivelación del relleno. Es común la presencia de tractores (buldóceres)

en las zonas de terraplenado para dar forma a la geometría del relleno.

3.5.2.5 Nivelación y extendido

Tras la descarga de las tierras en la zona de construcción del relleno se procede a su extendido en tongadas. El espesor de las tonadas vendrá definido por las características constructivas del relleno. Una vez extendidas tierras, se realiza la nivelación de la tongada hasta asegurar el espesor que deberá tener la capa. Se trata de un trabajo refinado mediante el cual se definen la geometría y dimensiones del relleno.

Aunque es frecuente el empleo de tractores en la realización de estos trabajos, el equipo de nivelación por excelencia es la motoniveladora, con una hoja de gran tamaño, capaz de adaptarse a la geometría del relleno en cada momento.

Los trabajos de nivelación y extendido preceden a los trabajos de compactación de las tongadas, de lo que hablaremos en el punto siguiente.

Las partidas de nivelación y extendido se suelen valorar por metro cuadrado de tierras extendidas o por metro cúbico nivelado. Es común que aparezcan repercutidas en la partida de compactación de tierras.

3.5.2.6 Compactación

La compactación de los suelos se realiza con vistas a mejorar sus características mecánicas, en términos de resistencia a la deformación, estabilidad volumétrica y menor permeabilidad del terreno. Se realiza en la construcción de terraplenes en obras de carreteras, rellenos de apoyo para construcciones, rellenos de zanjas para paso enterrado de instalaciones, etc.

Las labores de compactación deben llevarse a cabo durante todo el proceso de construcción de la explanación. Así, cada tongada (de espesor entre 0,5 y 1,5 metros por lo general) será sometida a un proceso de compactación por medio de equipos de compactación especializados que realizarán las pasadas necesarias hasta alcanzar los niveles de compactación requeridos. Posteriormente se procederá al extendido de la siguiente tongada. Los trabajos de compactación se llevan a cabo por zonas, permitiendo que la obra pueda avanzar en otras partes de la explanación ya compactadas. En este sentido, es importante dimensionar las unidades y los medios mecánicos de compactación necesarios que puedan absorber el volumen de tierras procedentes de la excavación.

La compactación por procedimientos mecánicos consiste en la recolocación de las partículas del terreno mediante el apisonado, de modo que, reduciendo el volumen de huecos existente podemos conseguir una mayor consistencia y capacidad de soporte de las tierras. Se entiende como capacidad de soporte a la resistencia a la deformación de una capa de suelo, con relación a las cargas aplicadas. Es de interés conocer que la capacidad de soporte de los suelos que constituyen las capas del relleno se determina en laboratorio mediante el ensayo CBR (California Bearing Ratio). Los suelos saturados (en los que el volumen de huecos está ocupado por partículas de agua en su totalidad) tendrán una capacidad de soporte menor que los suelos secos.

Los factores de los que depende la compactación son: la humedad de las tierras, la energía de compactación y la tipología del suelo. La energía empleada en el proceso está relacionada de forma directa con la humedad óptima de puesta en obra (la indicada en proyecto) y depende del equipo de compactación y del sistema empleado. El empleo de una energía de trabajo excesiva puede provocar la saturación del terreno, debiendo proceder a su desecación. Algunas técnicas utilizadas para la reducción de la humedad del relleno consisten en el raspado de su cara superior.

3.5.3 Maquinaria de obra

La habilidad del constructor para adjudicarse proyectos y ejecutarlos obteniendo un beneficio a su conclusión viene determinada por dos activos fundamentales: el coste de la mano de obra y el de los equipos mecánicos. Para ser competitivo, la maquinaria empleada debe ser competitiva económicamente. Los equipos desarrollados hace algunos años no pueden competir en términos de rendimiento de la producción con los nuevos modelos existentes en el mercado.

En las obras de caminos, durante las operaciones de MdT, los equipos no trabajan como unidades

independientes, sino que lo hacen en cadena. La “flota” agrupa todos los equipos mecánicos de los que dispone el constructor en obra y que, debiendo ser coordinados, constituyen una unidad de producción en la que la operación de una máquina viene condicionada por otra.

Un estudio previo de las características de los equipos y de sus rendimientos alcanzables en base al terreno existente se antoja necesario para poder realizar una buena selección de la maquinaria, que será aquella que permita que los equipos alcancen rendimientos cercanos a su producción óptima, de manera que se alcancen los objetivos de tiempo y coste de la obra.

Otro factor que analizar es la capacidad del contratista para contar con determinados equipos en obra. Las operaciones de movimiento de tierras requieren de grandes despliegues de maquinaria en campo, lo que se traduce en costes elevados derivados del alquiler de los equipos. Si la maquinaria es propiedad del constructor, éste optará por utilizar sus equipos siempre que pueda. Deberán analizarse los principales proveedores de maquinaria de la zona, así como los tiempos y costes de alquiler y suministro de los equipos.

Debemos recordar que no hay una solución única para el estudio de selección de maquinaria. De hecho, es un proceso que requiere el empleo de herramientas de planificación para poder llevarlo a cabo.

En este punto se presentan algunos de los equipos más utilizados en obras lineales en la actualidad como son: traíllas convencionales y mototraíllas, buldóceres, dúmperes, excavadoras, palas cargadoras, camiones, niveladoras y compactadores.

3.5.3.1 Mototraíllas

Se trata de equipos específicamente diseñados para su uso en obras lineales de caminos, y especializados en la ejecución de las operaciones de excavación, carga, transporte, descarga y extendido de las tierras.

Las mototraíllas (scrapers) de doble tracción se caracterizan por la existencia de parte tractora, con dos motores, uno delantero y otro posterior, y tienen tracción en los dos ejes. Se disponen neumáticos en cada eje. Cuentan con una caja abierta con un dispositivo de descenso, corte, ascenso y descarga de las tierras. La carga puede realizarse de manera natural, durante el avance de la mototraílla, o con la ayuda de un elevador de paletas en la parte frontal de la caja. El elevador de paletas consiste en un sistema compuesto por palas de acero y un motor que las hace girar en la dirección de carga de las tierras, favoreciendo de esta forma su acopio en la caja. Una vez terminada la carga, la caja asciende a su posición de transporte quedando cerrada por su parte delantera. El dispositivo de corte de la máquina es la propia caja de la mototraílla, que cuenta con una cuchilla de modo que, al descender se clava en el terreno, arrancando las tierras durante su avance. La descarga de las tierras comienza con la apertura y descenso simultáneos de la caja, sin llegar a clavar la cuchilla. A medida que avanza, las tierras se descargan por gravedad. Pueden disponer de un pistón de descarga que empuja las tierras hacia el exterior, favoreciendo la descarga. La profundidad de corte y descarga es limitada y no suele superar los 50 centímetros. Durante la descarga, las mototraíllas realizan un extendido y compactado previo de las tierras, al pasar por encima de éstas, favoreciendo el trabajo posterior de los equipos de nivelación. Son equipos ágiles, capaces de moverse de un lugar a otro de la obra con velocidades comprendidas entre 30 y 65 km/h.

Las mototraíllas se complementan en ocasiones con una segunda mototraílla, trabajando en pareja, recibiendo el nombre de mototraíllas de empuje y arrastre (pull-push). Para que esto sea posible, la mototraílla presenta en su parte delantera un dispositivo de enganche controlado desde la cabina y un plato de empuje, y en su parte posterior dispone de un tope y un gancho fijo. La primera mototraílla comienza su ciclo de corte y, mientras lo hace, la otra la empuja, mejorando la carga de las tierras. Una vez terminada su carga, la primera mototraílla tira de la segunda hasta que ésta completa su carga. El empuje no cesará hasta que la segunda mototraílla haya superado el escalón ocasionado por el corte en el terreno. Suelen trabajar en tándem con otras mototraíllas, aumentando así su producción, o hacerlo con un equipo empujador, normalmente un bulldozer sobre cadenas. El bulldozer empujará a la mototraílla hasta que se complete la carga de la caja y la mototraílla haya superado el escalón de corte.

A continuación, se mencionan una serie de factores a tener en cuenta a la hora de valorar la conveniencia de utilizar mototraíllas en la obra. Estos son: la disponibilidad de los equipos, la distancia económica del equipo, el estado de la obra, el relieve del terreno, las distancias de carrera de arranque y carga, el empleo de mano de obra cualificada y la experiencia de su utilización en obras previas.

Las mototraílla realizan el transporte de las tierras de manera competitiva en distancias comprendidas entre los

150-200 m y 2000 m (aunque de manera habitual se estima una distancia de transporte en condiciones económicas de hasta 1600 m), por encima de estas distancias su rendimiento disminuye respecto a los equipos habituales de transporte (camiones y dúmperes). Son intermedias entre éstos y los bulldozers y palas cargadoras de neumáticos, que resultan competitivos a distancias significativamente menores (por debajo de 100 m).

Debido a su menor altura sobre el terreno, las mototraíllas requieren de pistas bien cuidadas para realizar el transporte. El mantenimiento de las pistas es importante y las mototraíllas se suelen emplear en los trabajos de conservación. En los trayectos en vacío, en las zonas donde se requiera, el conductor hará descender la cuchilla, nivelando el terreno y mejorando el estado de la pista de circulación a su paso.

Entre los inconvenientes que presentan destaca que se trata de equipos con un alto coste de adquisición y de operación, ya que requieren de la contratación de mano obra experimentada. Su consume de combustible es también mayor al de otros equipos de transporte.

Las mototraíllas, por lo tanto, no son mejores o peores que otros equipos especialistas en arranque o transporte de movimiento de tierras, dependerá de cada situación concreta. Como idea fundamental, incidir en la necesidad de conocer bien la obra que vamos a ejecutar, los condicionantes existentes y la geometría del terreno. De esta forma podremos realizar una buena selección de los equipos y diseñar un procedimiento de trabajo adecuado.



Ilustración 6 – Mototraílla Caterpillar

3.5.3.2 Buldóceres

Los tractores o buldóceres son equipos de obra especializados en el arranque y movimiento de materiales. Estas operaciones las realizan por arrastre. Se trata de equipos pesados y robustos. Se caracterizan por la existencia de un chasis donde se sitúa la cabina del maquinista y se ubica el motor, disponen de una cuchilla de gran tamaño en su parte delantera y un dispositivo de acople en su parte trasera. La cuchilla es la herramienta de trabajo de los buldóceres. Se trata de un dispositivo de accionamiento hidráulico que, operado desde la cabina, cuenta con cilindros hidráulicos que la hacen ascender o descender para acoplarse a la tarea que deben realizar. Estos equipos, sin embargo, no están habilitados para realizar la carga de las tierras en los medios de transporte.

Los buldóceres se clasifican en función de su tamaño, el tipo de cuchilla y la naturaleza de su desplazamiento. La creciente demanda y las exigencias productivas que tuvieron lugar a lo largo de la primera mitad del siglo XX contribuyeron al desarrollo de estos equipos. Con el paso de los años estos equipos se hecho más sofisticados y eficaces. Actualmente existen buldóceres de tamaños muy variados y que se diferencian en la potencia útil que son capaces de generar y transmitir al terreno para realizar su trabajo. Se trata de equipos pesados, que transmiten altas presiones al terreno. En este sentido favorecen la compactación y el mantenimiento de las pistas en buen

estado.

Existen tres tipos de cuchillas diferentes en el mercado: cuchilla plana, universal y semiuniversal. La cuchilla plana (“cuchilla S”) consiste en una hoja recta sin aletas a lo lados, y se suele utilizar en trabajos de repaso; la universal (“cuchilla U”) tiene una disposición alta y muy curvada, con grandes aletas laterales para maximizar la carga de tierras; la cuchilla semiuniversal (“semi-U”), es una opción intermedia a las anteriores, más corta, de menor curvatura y con aletas laterales más pequeñas que la cuchilla en U. Las aletas de la cuchilla se diseñaron con el objetivo de minimizar las pérdidas de material que tienen lugar durante el arrastre de las tierras. En los modelos más desarrollados, la cuchilla puede situarse en ángulo respecto al chasis de la máquina, dotando a la máquina de mayor versatilidad para desarrollar su trabajo.

Nos encontramos con buldóceres de cadenas (“orugas”) y buldóceres con neumáticos. El modelo por excelencia es el buldócer de orugas o cadenas. Debido a su amplia superficie de contacto con el terreno puede desempeñar su actividad perfectamente en terrenos accidentados o fangosos. El tractor de neumáticos de tracción total es una variante del buldócer tradicional de cadenas. Entre sus ventajas destacan sus menores costes de mantenimiento y mayores velocidades de desplazamiento.

Como hemos comentado, los buldóceres fundamentalmente se emplean en la excavación y el acarreo de tierras a distancias relativamente amplias (hasta 100-150 m son rentables), pero también se utilizan en el perfilado de taludes, y en las labores de extendido y nivelación de las tongadas que constituyen el relleno. Llevan a cabo una compactación previa por la presión uniforme que transmiten al terreno. Se suelen emplear en la realización de trabajos de escarificado previo a la excavación del terreno, cuando nos encontramos con suelos de difícil excavabilidad. También se utilizan, en función de la obra, como equipo de empujador de mototraíllas durante los trabajos de excavación o de otros buldóceres con los que trabajan en serie.



Ilustración 7 – Buldóceres trabajando en paralelo

3.5.3.3 Palas cargadoras

Las palas cargadoras o, simplemente, cargadoras, son equipos de movimiento de tierras especializados en las operaciones de carga. Se trata de vehículos motorizados sobre neumáticos, de tracción a las cuatro ruedas, con un chasis donde se encuentran la cabina de mandos del maquinista y el motor, y que presenta en su parte frontal un cazo que, por medio de pistones hidráulicos, es capaz de dibujar movimientos ascendentes y descendentes a la vez que rota sobre el eje que la sustenta. No trabajan en posición fija, sino que requieren del movimiento del equipo en su conjunto para proceder al llenado del cazo y desplazamiento hasta el punto de carga.

En el momento de proceder a recoger las tierras que previamente han sido excavadas, la pala se posiciona de

manera enfrentada a éstas, y realiza un movimiento descendente del cazo hasta que éste apoya sobre el terreno, acto seguido avanza en dirección a las tierras clavando el cazo en ellas. A continuación, el maquinista levanta la cuchara y, con la cara levantada, realiza una maniobra de marcha atrás, giro y avance hasta el punto donde procederá a su descarga.

La ventaja principal de estos equipos en la realización de la carga de material reside en la amplitud de movimiento que ofrecen. Las palas cargadoras pueden elevar la cuchara por encima del plano superior de la cabina, sin llegar a volcar, gracias a su centro de gravedad bajo y distancia entre ejes. De esta forma pueden alcanzar las bañeras de los equipos de transporte de manera sencilla.

Antes de seleccionar un modelo de pala determinado es importante conocer la hoja de características técnicas del equipo, proporcionada por el proveedor. De esta forma podremos calcular el número de palas cargadoras que necesitaremos para que la obra avance a buen ritmo.

Los parámetros característicos de una pala cargadora son los siguientes: altura de descarga, alcance, carga de vuelco y carga operacional y fuerza de arranque: la altura de descarga corresponde a la posición más elevada a la que puede situarse el cazo de la pala, permitiendo la descarga de las tierras; el alcance es el radio de actuación o movimiento del cazo; la carga de vuelco es el peso o carga máxima que la pala puede trasladar en su posición más desfavorable sin llegar a volcar; la carga operacional establece los parámetros de operación adecuados, es decir, aquellos que generan rendimientos de operación altos; la fuerza de arranque es la energía que la pala es capaz de transmitir al terreno con el objetivo de proceder a su excavación.

Las palas cargadoras se emplean también en la excavación y transporte de tierras. Además, se emplean a menudo en labores de explanación del relleno y perfilado de taludes en terraplén y desmonte.



Ilustración 8 – Pala cargadora sobre ruedas durante la operación de carga de tierras

3.5.3.4 Excavadoras hidráulicas

Ya sea en el ámbito de la obra civil, en proyectos de desarrollo urbanístico, excavaciones de zanjas para alojar las redes de servicios, o en proyectos de construcción de obras lineales, las excavadoras son el equipo de trabajo que ofrece mayores rendimientos de excavación. Se utilizan también en edificación, realizando los trabajos de vaciado para la cimentación y las plantas bajo rasante. Aunque en las obras de caminos también se trabaja, como ya hemos comentado, con otros equipos de excavación como las mototraillas o los buldóceres, las excavadoras continúan siendo el equipo más utilizado.

Se trata de equipos especializados en las operaciones de excavación y que trabajan en posición fija. Su utilización es recomendable a excepción de los casos en que la dureza del terreno obligue a realizar un trabajo de escarificado previo, para lo cual se utilizarán tractores sobre cadenas.

Existen excavadoras hidráulicas sobre cadenas y sobre neumáticos. Las velocidades de desplazamiento se encuentran en el rango de 0 a 20 km/h para las excavadoras de ruedas y hasta 3 km/h para las excavadoras sobre

cadenas. Las retroexcavadoras sobre ruedas incorporan apoyos estabilizadores que activan durante el proceso de arranque de las tierras, debido a una menor adherencia al terreno que aportan los neumáticos.

Por lo general las excavadoras de mayor tamaño se diseñan con tren de rodaje sobre cadenas, ya que distribuyen mejor el peso de la máquina sobre el terreno, favoreciendo el movimiento de la máquina en terrenos húmedos, fangosos y con pendientes abruptas. Sobre el tren de rodaje se ubica la cabina del maquinista y el motor del equipo. Presenta una corona de giro que permite a la máquina girar sobre sí misma en un rango de 360°. De esta forma el equipo puede excavar, girar con las tierras cargadas en el cazo y proceder a su descarga sobre el vehículo que posteriormente llevará a cabo el transporte de las tierras.

Como hemos dicho, las excavadoras trabajan en posición fija, es decir, una vez posicionadas no varían su posición durante la excavación hasta que el frente de excavación queda fuera de su alcance. Entonces la máquina se desplaza y vuelve a una nueva posición de trabajo para continuar con la excavación. Esta es la característica principal que las diferencian de otros equipos de trabajo. Poseen un brazo hidráulico que les otorga un gran alcance y rango de operación. El brazo se conecta al núcleo de la máquina y en él se diferencian tres partes: la pluma, el brazo y el cazo. La pluma es el elemento que se articula en la parte frontal de la máquina y cuenta con uno o dos cilindros de elevación que se utilizan para elevarla o bajarla. Puede estar formada por un único elemento (monobloque) o por dos piezas unidas mediante una articulación. El brazo es el eslabón o elemento intermedio. Se articula a la pluma y en su extremo final se sitúa el cazo de la máquina. El movimiento del brazo lo realiza un cilindro hidráulico situado sobre la pluma y que se une al extremo anterior del brazo. El cazo o cuchara es la herramienta de trabajo de la máquina, se articula al brazo, sobre el que se instala un nuevo cilindro hidráulico con una palanca de descarga que se utiliza para hacer girar a la cuchara y así proceder a su vaciado o llenado. El cazo puede ser de dos tipos: cazo de descarga convencional y cazo con descarga por el fondo.

Las excavadoras o retroexcavadoras reciben su nombre en función de la orientación de la cuchara respecto a la máquina, que depende de las características de la excavación:

Se conocen como retroexcavadoras cuando la atura del frente de trabajo está por debajo del plano de apoyo de la máquina. Las excavadoras sobre ruedas únicamente son del tipo retroexcavadoras. En este caso, el cazo se posiciona con los dientes orientados hacia adentro. Para proceder al arranque de las tierras, la máquina realiza un movimiento descendente y en dirección hacia la máquina. La realización de estos trabajos requiere tener gran cuidado pues, a medida que la excavación avanza, se produce el arranque de las tierras ubicadas bajo el terreno donde apoya la máquina, lo que puede dar lugar a desprendimientos y accidentes en el trabajo. La experiencia del maquinista en este sentido es importante, para evitar tomar riesgos excesivos que puedan conducir a situaciones no deseadas. Muy comunes en trabajos de vaciado del terreno, excavación de zanjas destinadas a tuberías y otras canalizaciones, refino de taludes y cajado de cimientos para edificios.

Cuando la altura del frente de trabajo está por encima del plano de referencia del suelo, la cuchara se posiciona con los dientes hacia afuera. A esta disposición se le conoce como excavadora con equipo de empuje frontal. En este caso, durante el proceso de arranque el cazo se mueve alejándose de la máquina y en dirección ascendente, elevándose en un plano superior al de sustentación de la máquina. Tiene su aplicación, como ya hemos mencionado, en excavación por encima del plano de apoyo de la máquina (bancos en altura) y para la carga de fragmentos de roca después de realizada la voladura.

Las excavadoras también pueden desempeñar diferentes funciones cuando se utilizan con otras herramientas de trabajo instaladas directamente en el extremo final del brazo, como la cuchara bivalva, para trabajos de excavación en fangos y lodos, haciendo las labores de grúa mediante el acople de un gancho o con martillo rompedor hidráulico realizando trabajos de demolición.

En la actualidad, existen modelos de retroexcavadoras de tamaños muy variados. Máquinas que pueden utilizar distintas longitudes de brazo o que son aptas para trabajar con cazos de diferentes tamaños. La capacidad de la cuchara es determinante para la obtención de grandes producciones. Deberá estar en correspondencia con la altura del frente de excavación. En este sentido, para calcular las producciones de la excavación se evalúa la capacidad colmada de la cuchara. A la hora de escoger una cuchara y longitud de brazo determinadas hay que prestar atención a la ficha proporcionada por el fabricante, conocer la naturaleza del material a excavar, la fuerza de arranque de la máquina, la profundidad máxima de excavación, el alcance máximo en el plano del suelo y la altura máxima de corte, entre otras cosas.

Otros factores de los que depende la producción son el grado de llenado, la capacidad del medio de acarreo, la duración del ciclo de trabajo, el ángulo de giro y la organización de la obra. El grado de llenado depende de la

naturaleza del material y se considera por medio del factor de llenado *fl*. La capacidad del medio de acarreo debe ser de 3 a 6 veces la capacidad del cazo de la excavadora. Una buena práctica es realizar el llenado del camión con 5 o 6 cucharas completas. El ángulo de giro conviene que no sobrepase los 90°. Un mayor tiempo invertido en giros y maniobras implicará un aumento en el tiempo de ciclo de trabajo de la máquina.

Es importante definir en este punto los conceptos de carrera y carrera óptima. El rendimiento del equipo dependerá de la relación entre estos dos factores H/L. La carrera (H) es el recorrido que realiza la cuchara desde que penetra en el frente de excavación hasta que cesa la operación de corte. La carrera óptima (L) es aquella en la que se consigue el llenado completo del cazo en un solo recorrido.

El procedimiento de trabajo más habitual con retroexcavadora es la carga del equipo de transporte en un plano inferior al de apoyo de la máquina. Cuando la circulación en un plano inferior no es posible, la carga de material tiene lugar en el mismo plano. El dúmper se sitúa en paralelo a la excavadora que, tras realizar el corte, gira, posicionando el cazo sobre la bañera y procediendo a la descarga.



Ilustración 9 – Excavadora Caterpillar durante los trabajos

3.5.3.5 Camiones y dúmperes

Los equipos de transporte específicos para el acarreo de tierras en proyectos de obras lineales son dos: los camiones y los dúmperes. Las mototraíllas, como explicamos anteriormente, también pueden desempeñar esta función, con producciones elevadas cuando las condiciones de la obra son favorables para su utilización.

Como hemos indicado, los camiones son equipos especializados en el transporte de materiales. Cuentan con una bañera en su parte posterior, y que pueden ser rígidos o articulados. En los camiones rígidos la bañera no se puede separar de la cabina (donde se sitúa la unidad tractora). Suelen ser vehículos de dos o tres ejes a tracción total. Los camiones articulados se componen de la parte tractora y el semiremolque, donde se encuentra la bañera. Cuentan con dos o tres ejes en la parte tractora, mientras que el semiremolque puede ser de tres y cuatro ejes. Normalmente, uno de estos ejes es de seguridad, es decir, se activa de manera automática en función del peso de las tierras cargadas, ayudando a distribuir mejor el peso e incrementar el rendimiento de transporte del equipo. Se utilizan para trayectos de distancia mayor a la de los camiones rígidos, preparados para el transporte a distancias cortas y medias, y su capacidad de carga es también mayor. La descarga de material se realiza por medio de un pistón hidráulico situado en la base del semiremolque, que eleva la bañera y permite la descarga de las tierras por gravedad. La bañera dispone de una trampilla en la parte de detrás que, mediante su apertura y cierre permite la descarga y evita que se produzcan pérdidas durante el transporte, respectivamente.

Los dúmperes son equipos especializados para el transporte de tierras dentro de la obra. De capacidad y tamaños muy variados, se utilizan para cubrir grandes trayectos (son los equipos más rentables cuando se trata de distancias mayores a dos kilómetros). Al igual que los camiones, existen dúmperes articulados, de tres ejes, y dúmperes rígidos, de dos ejes y mayor tamaño y capacidad. Son equipos que se adaptan muy bien a las

condiciones existentes en las obras. Su dureza y capacidad de carga, que en algunos casos puede llegar a doblar a la de otros equipos como los camiones o las mototraíllas, los convierte en el equipo de transporte por excelencia en grandes proyectos de carreteras. Suelen trabajar en paralelo con una retroexcavadora y disponen de grandes neumáticos que les permiten desplazarse con facilidad en terrenos difíciles. Al igual que los camiones, su descarga se produce por la parte trasera, mediante un cilindro hidráulico situado en su parte inferior. Son equipos especializados, por lo que en ocasiones es difícil encontrarlos en el mercado. Para traerlos a obra, se necesitan trailers específicos para el transporte de maquinaria pesada.

Debido a sus características de peso y tamaño no se les permite la circulación por carretera. En obra pueden alcanzar velocidades de hasta 60 km/h en vacío y alrededor de 45 km/h en carga.

El tamaño de la flota, su tipología y características deberán asegurar que la excavación avanza con continuidad, es decir, que la maquinaria de excavación no está sujeta a paradas o tiempos de espera dilatados derivados de un mal dimensionado de la flota de transporte.



Ilustración 10 – Camión bañera acarreado tierras

3.5.3.6 Motoniveladora

Una vez se da comienzo a la, con los trabajos de excavación, también lo hacen los trabajos de construcción de la explanación. La geometría de la explanación de la carretera, por lo tanto, va tomando forma a medida que la excavación avanza.

Como ya mencionamos en puntos anteriores la explanación es el resultado de la correcta combinación de diferentes capas o niveles que, constituidas por materiales de diferente tipologías y características mecánicas, trabajan de manera conjunta aportando estabilidad y cohesión al relleno.

La formación del relleno comienza con el extendido de las tierras descargadas por los equipos de transporte. El equipo más empleado en la actualidad en las labores de nivelación y extendido es la motoniveladora. Se trata de un equipo a neumáticos con tres ejes y tracción en las seis ruedas. El chasis de la máquina está formado por la unidad motora y la cabina del maquinista, que se sitúan sobre los dos ejes traseros. Un bastidor fijo alargado que nace de su parte delantera culmina en el eje frontal, que permite el giro de la máquina. Cuentan con una cuchilla articulada al bastidor en su punto medio, conocida también como hoja vertedera. El sistema de transmisión de la motoniveladora permite que la hoja gire cerca de 90° en cada sentido (cubriendo así un radio de giro de casi 360°), pudiendo adaptar su posición a las condiciones del terreno en cada momento.

El procedimiento de trabajo de la motoniveladora consiste en realizar largas pasadas mientras se desplaza en la dirección del eje de la obra. De esta forma, el equipo realiza un movimiento lineal, siendo la cuchilla la que se adapta a la configuración del terreno en cada momento. Tras haber realizado el extendido de las tierras, se procede a su nivelación. Se trata de un trabajo de perfilado más fino que el extendido.

Las motoniveladoras cuentan con un dispositivo de acople de herramientas de trabajo en su parte frontal, y otro

en su parte posterior. De esta forma, es común ver motoniveladoras con dos hojas o realizando trabajos de escarificado en terrenos duros.

3.5.3.7 Compactadores

La compactación de las tierras es la operación final que se realiza sobre cada una de las tongadas que forman las distintas capas de un relleno. Tras la compactación, las tierras previamente extendidas y niveladas experimentan una reducción en su volumen para alcanzar el espesor de capa deseado. Esta reducción tiene que ver con la disminución del volumen de huecos (aire y agua) presente en el suelo. La compactación determinará los niveles de dureza, humedad, permeabilidad y resistencia final del paramento.

La maquinaria especializada en la ejecución de estos trabajos son los compactadores. Estos equipos cuentan con un eje con neumáticos posterior sobre el que se ubican el motor y la cabina de mandos, y disponen de un rodillo frontal de gran envergadura que actúa como eje delantero del vehículo. Pueden disponer también de dos rodillos sobre los que apoyan.

Los compactadores varían en función de su tamaño y las características del rodillo, que está directamente relacionados energía de compasión que la máquina es capaz de transmitir al terreno para compactarlo. Pueden ser de varios tipos: compactador de rodillo liso, compactador de alta velocidad con pata de cabra, compactador de doble rodillo... Se seleccionará uno u otro en función de los requisitos de compactación establecidos para la ejecución de la explanación.

El modo de operación de los compactadores consiste en circular por encima del soporte del relleno, en su dirección longitudinal, realizando un número determinado de pasadas hasta alcanzar el nivel de compactación deseado. Además del número de viajes o pasadas que deberán realizarse sobre cada tongada, se estudiará también la velocidad de movimiento de la máquina, que influirá en el rendimiento de compactación obtenido. Normalmente en obra, aunque por la experiencia se suele conocer los valores de energía de compactación y número de pasadas a realizar sobre las tierras de un espesor determinado, es frecuente realizar ensayos al inicio de los trabajos y con diferentes equipos.

En función del volumen de tierras que llegan a las zonas de rellenos desde préstamos u otros puntos de la excavación se necesitarán un número diferente de equipos de compactación, de mayor o menor tamaño, que trabajen estas tierras. No tiene sentido avanzar en la excavación con gran rapidez si en las zonas de relleno no se alcanzan producciones similares y, por tanto, se generan acopios de tierras en estos puntos que pueden resultar perjudiciales para la organización de la obra.



Ilustración 11 – Compactador de rodillo liso Caterpillar

3.5.4 Rendimiento y coste de los trabajos

Con el fin de alcanzar los objetivos de coste y plazo de la obra, el contratista debe estar al tanto de los equipos, procedimientos y métodos más avanzados que se estén utilizando en la ejecución de obras de carreteras en el momento, es decir, no puede quedarse estancado en técnicas de construcción improductivas y maquinaria de obra obsoleta en términos de rendimiento en comparación con los nuevos equipos de obra existentes en el mercado. La experiencia como se dice es un grado, y marcará la capacidad del contratista para afrontar la obra con las mayores garantías. El contratista deberá presentar una planificación “contractual” donde se detallen los tiempos de ejecución y la estructura de avance de los trabajos de movimiento de tierras en la obra. También deberá presentar la planificación económica de la obra, que refleja el avance en términos económicos de la ejecución de los trabajos.

Como ya hemos comentado, existen diferentes equipos y combinaciones de equipos que permiten realizar un proyecto en condiciones de garantía. El trabajo del contratista es saber seleccionar los equipos que, garantizando una buena ejecución de la obra, permitan finalizarla en el menor tiempo posible y al menor coste.

Esta decisión, aunque pueda parecer sencilla, no lo es, y requiere de un estudio detallado debido a la cantidad de factores que condicionan la elección de las máquinas. Estos factores son la calidad de los suelos presentes en la traza, su excavabilidad, la geometría del terreno existente, los equipos con los que cuenta en propiedad del contratista (o los que pueda adquirir de un proveedor de maquinaria de obra), el coste de los equipos, las necesidades de la mano especializada, las condiciones meteorológicas en la zona, etcétera.

El coste en el cual se encaja una obra de caminos dependerá fundamentalmente del volumen de la obra, su complejidad, el diseño del trazado, los materiales considerados y los equipos de obra utilizados. El plazo de ejecución estará condicionado de igual modo por estos factores, y en este influirá en gran medida la capacidad de trabajo de los equipos en las condiciones existentes en la obra. Es aquí donde aparece el término de rendimiento o producción de los equipos de movimientos de tierras seleccionados.

La producción o rendimiento de una máquina se define como el número de unidades de trabajo que es capaz de realizar en la unidad de tiempo. Se suele emplear como unidad de trabajo el metro cúbico o la tonelada, y la unidad de tiempo la hora, aunque también se suele emplear el día. Para las operaciones de excavación el rendimiento lo marcará el volumen de tierras que el equipo es capaz de excavar en la jornada de trabajo.

Supongamos, por ejemplo, que podemos realizar la excavación de un desmonte con tractor de cadenas o una retroexcavadora, de mayor coste. El coste del tractor será menor, pero requerirá del empleo de una pala cargadora para realizar el trabajo. Así, se presentan dos formas de ejecutar los trabajos, y deberán analizarse tanto el coste como el plazo final de los trabajos, antes de proceder a seleccionar un equipo de excavación u otro.

La optimización de la producción frente al coste es el trabajo del constructor. Deberán compararse los costes asociados al trabajo de las máquinas con la producción generada y los tiempos requeridos en los trabajos. Tener un gran número de equipos en la obra no asegura grandes producciones, ya que si la organización de la obra es mala podrían producirse interferencias entre operaciones y equipos que originen retrasos en los trabajos. El empleo de equipos de menor tamaño y que generan menores rendimientos deriva en costes de alquiler y operación también menores, pero tienden a retrasar la finalización de los trabajos. Debemos tener en cuenta que una obra que se alarga en el tiempo es una obra que seguramente tendrá sobrecostes por este motivo, por lo no suele ser conveniente alargar los plazos. El análisis, por tanto, puede resultar complejo.

El rendimiento de la máquina no es una característica intrínseca de la misma, sino que depende de una serie de factores que cambian de una obra a otra o incluso durante el transcurso de una misma obra. Estos factores, algunos de los cuales ya mencionamos anteriormente, son: las condiciones de trabajo de la obra (el tipo de suelos, el relieve del terreno), el trazado de la obra (pendientes y curvas), el estado de los accesos, el clima, la habilidad y experiencia de los operadores de maquinaria y el estado y mantenimiento de la máquina.

El concepto de ciclo de trabajo es fundamental para determinar la producción de los equipos en obra. El ciclo de trabajo de una máquina es la secuencia de operaciones que ésta realiza para llevar a cabo su tarea. Sabiendo esto, podemos determinar el tiempo del ciclo de la máquina, que es el invertido en la realización de un ciclo de trabajo. A la hora de evaluar el tiempo de ciclo podemos descomponerlo en una parte fija, aquella cuya duración suele mantenerse relativamente constante (se incluyen aquí los tiempos de carga, descarga y tiempos de maniobras), y otra variable, que considera los tiempos de transporte de material y vuelta al punto de partida de los equipos. Es importante considerar separadamente los tiempos de ida y vuelta, debido al efecto de la carga y

la orientación de las pendientes en cada caso en la velocidad de transporte de los equipos. Aunque la repercusión del peso del material transportado en las velocidades alcanzadas por los equipos habilitados para la circulación por carretera, como los camiones, no tiene una relevancia significativa, sí que la tiene, para los equipos de trabajo dentro de la traza, pudiendo haber grandes diferencias de velocidad durante los trayectos de ida y vuelta. Para las máquinas de excavación de tierras el tiempo de ciclo será el invertido en cargar, trasladarse, girar, descargar y volver a la posición inicial.

En base a la experiencia podemos realizar una estimación de la duración del tiempo de ciclo de los equipos. No obstante, es común que, una vez en obra, se realice la medición de un número elevado de ciclos de trabajo, de manera que obtengamos información precisa acerca de los tiempos de ciclo reales para diferentes equipos y condiciones de trabajo. De esta forma, el contratista podrá estimar de forma precisa el avance de los trabajos respecto al plazo de proyecto. Conociendo el tiempo de ciclo y la capacidad de carga de los equipos podemos determinar la producción que desarrollará, y que se define de la siguiente forma:

$$\text{producción} \left(\frac{m^3 \text{ o } tn}{h} \right) = \text{capacidad} \left(\frac{m^3 \text{ o } tn}{\text{ciclo}} \right) \times \frac{N^{\circ} \text{ ciclos}}{\text{hora}}$$

No obstante, los rendimientos, trasladados a la realidad de la obra, suelen diferir de los teóricamente alcanzables por cada tipo de máquina. Esto se debe a que el desempeño de los equipos está directamente relacionado con el factor humano, es decir, la habilidad o capacidad del maquinista en el manejo de la máquina, la organización de la obra y el tiempo real de disponibilidad de la máquina descontando los tiempos de reparación de averías y mantenimientos necesarios. De esta forma, la producción real es el resultado de aplicar una serie de factores de corrección al rendimiento teórico del equipo. Entre los factores más relevantes que condicionan el desempeño de los equipos destacan los siguientes.

La eficiencia horaria (fh) determina el número de minutos realmente trabajados por cada hora de trabajo. Este factor puede variar a lo largo de una obra y en función de la época del año en que nos encontremos. Por lo general, suele considerarse una eficiencia horaria de 45 o 50 minutos trabajados a la hora. Existen medidas, como los incentivos a la producción (pagos extras por un mejor desempeño de los trabajos) que se aplican con vistas a aumentar la motivación y el rendimiento de los trabajadores. Si las condiciones de trabajos son buenas, la obra está bien organizada y se establecen incentivos a la producción, la eficiencia horaria mejorará, pero suele ser difícil alcanzar valores superiores a 0,90. Si, por el contrario, las condiciones de trabajo son adversas y mala la organización en la obra, la eficiencia puede caer a 0,5 o situarse en valores menores.

La elaboración de un programa de mantenimiento que reduzca las averías y los tiempos en taller de los equipos, y que permita disponer de ellos más rápidamente, favorecerá los tiempos de disponibilidad de la máquina, es decir, el tiempo que el equipo está en las condiciones óptimas para realizar su trabajo y, por tanto, mejorará la eficiencia horaria. No obstante, la aplicación de medidas de mantenimiento preventivo (sustitución de piezas cada cierto tiempo con el objetivo de evitar averías) y predictivo (aplicación de técnicas que permiten analizar el estado de la máquina y predecir futuras averías), con vistas a evitar que un fallo pueda desencadenar otro mayor y reducir así los tiempos de indisponibilidad de los equipos, no es un procedimiento de trabajo común en la actualidad, más basado en la aplicación de correctivos una vez se ha producido la avería. En este caso, el contratista deberá preocuparse de tener en el taller de obra stock suficiente de los recambios y las herramientas más utilizadas, evitando así que el tiempo de suministro de una determinada pieza suponga la parada de un equipo concreto durante un periodo de tiempo importante. En la práctica suele tomarse 1600 horas como un valor representativo de la disponibilidad anual de una máquina, siendo difícil, por lo general, superar esta cifra.

El factor de organización de la obra, que en las ecuaciones de cálculo de la producción se define como “fm” repercute directamente en los rendimientos obtenidos. Como ya hemos comentado se relaciona con el estado de las pistas y de las zonas de trabajo.

El factor de llenado de los equipos depende de la tipología y densidad de las tierras. Los suelos de difícil excavabilidad suelen romper en rocas grandes que reducen el aprovechamiento del volumen neto de transporte de los equipos. Los suelos granulares y de grano fino suelen favorecer el llenado completo de los camiones.

Es de interés mencionar el origen de las pérdidas de tiempo en el uso de los equipos. La habilidad del trabajador es el factor más importante, suponiendo alrededor de un 15% de las pérdidas de tiempo globales. Otras pérdidas provienen de los tiempos fijos de maniobras (8%), los tiempos de espera de las máquinas (11%), las condiciones meteorológicas (9%) y las averías mecánicas (6%). Las pérdidas de tiempo máximas pueden alcanzar un 60% del tiempo total de disponibilidad de los equipos.

4 CÁLCULO DE VOLÚMENES Y COMPENSACIÓN DE TIERRAS

En apartados anteriores hablamos de la repercusión económica que tiene para el proyecto la realización de los trabajos de compensación de tierras en las obras de caminos. Mencionamos la importancia del diseño del trazado en la complejidad de ejecución de la obra, los tiempos y el coste. El trazado en planta y las cotas establecidas para la rasante del proyecto deben estudiarse con objeto de evitar estos sobrecostes en la construcción derivados de una mayor duración de los trabajos y el impacto de la obra en su entorno. De hecho, este último es el requisito mayor que establece la Administración para la aprobación de un proyecto de estas características.

La alineación de la rasante respecto al terreno implicará tramos de trabajos en excavación y zonas en terraplén que deberán ser rellenadas para actuar como soporte de la carretera. En términos medioambientales, la importancia del impacto visual y de modificaciones en el relieve del terreno pueden influir en el diseño geométrico de la obra. La búsqueda de un trazado corto que conlleve modificaciones controladas sobre el terreno es el objetivo de estos trabajos. Por ejemplo, rodear una ladera puede resultar en una longitud del trazado mayor y a su vez simplificar la ejecución de la obra por la compensación transversal de volúmenes. Mientras que realizar el corte de la montaña, además del impacto ambiental de la obra, se traducirá en volúmenes de excavación y transporte de tierras mayores. Se trata, por tanto, de un trabajo de optimización entre longitud del trazado y volúmenes de excavación que requiere un estudio y conocimiento detallado de la zona de afección.

En este Trabajo partimos de un diseño del trazado dado, y de un proyecto que nos aporta los datos necesarios en cuanto a tipología de los suelos, volúmenes de excavación y terraplenado por secciones, localización de préstamos y vertederos, canon de tierras, características técnicas de la maquinaria de obra, etcétera.

El cálculo de volúmenes se realiza a partir de los perfiles transversales, que definen las zonas de trabajo en desmonte y terraplenado a lo largo de la obra. Por lo general, en obras de caminos se toman secciones transversales cada 20 o 30 metros de longitud.

4.1 Cálculo de áreas

Actualmente, existen softwares avanzados en ingeniería civil que proporcionan las cuantías de volumen aprovechable y/o requerido en cada una de las secciones en las que se divide el trazado. Los métodos tradicionales de cálculo de volúmenes comienzan determinando las áreas de desmonte o terraplén en cada uno de los perfiles transversales considerados. El procedimiento habitual consiste en subdividir del área en formas geométricas sencillas, cuya superficie puede calcularse mediante fórmulas conocidas, aprovechando que la geometría de un perfil en terraplén se constituye una agrupación de estas figuras (triángulos, rectángulos, paralelogramos y trapecios). También ocurre esto cuando la excavación requiere la ejecución de taludes en desmonte para sujeción de las tierras, asemejándose de esta forma a un terraplén invertido. La fórmula general para el área del terraplén define la suma de esta descomposición de áreas. Debe tenerse en cuenta que se trata de un cálculo aproximado, que adquirirá mayor precisión en función del número de divisiones que consideremos al descomponer el perfil transversal.

En el caso de secciones a media ladera, en las que de manera habitual se presentan zonas de desmonte y relleno en la misma sección transversal, las áreas deben calcularse por separado.

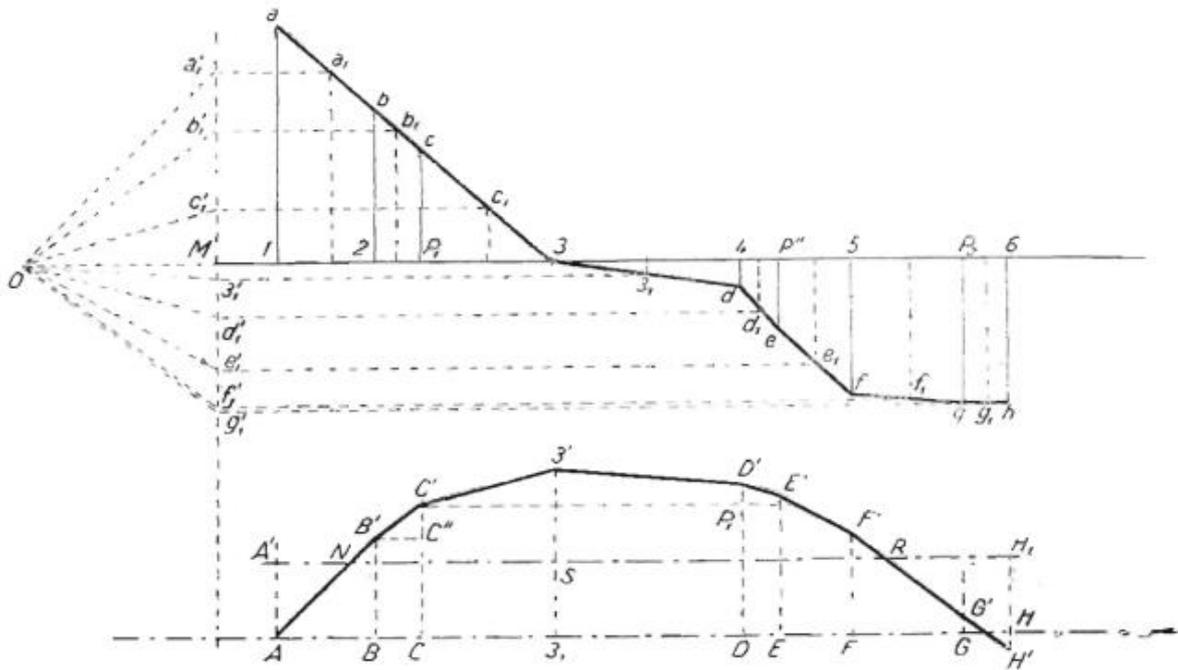


Ilustración 12 – Representación de la curva de volúmenes en base a un perfil dado

4.2 Cálculo de volúmenes entre perfiles transversales

El cálculo del volumen de relleno o terraplenado entre dos secciones transversales consecutivas puede calcularse promediando sus áreas y multiplicando por la distancia que las separa. Al igual que el procedimiento de cálculo de áreas, no establece un método exacto, debido a que la media de las dos áreas extremas no tiene por qué coincidir con la media real de muchas áreas intermedias. No obstante, la desviación del volumen que aporta el método de cálculo es de un 1 por ciento respecto al real de campo. Para mayor precisión de cálculo puede considerarse un número mayor de divisiones transversales, es decir, plantear distancias entre secciones menores. Sin embargo, calcular en base a secciones por debajo de 20 metros de longitud no se considera una buena práctica, ya que el beneficio que supone la mayor precisión de cálculo puede resultar contraria a una mejor planificación y organización de los tajos. Cuando nos encontramos con relieves complejos, donde se producen cambios abruptos de la disposición del terreno, deberán considerarse un mayor número de divisiones transversales para realizar el cálculo, pero a la hora de abordar la planificación de la obra deberá tomarse el número de secciones de trabajo necesario para optimizar la organización de la obra. No tiene sentido tomar secciones de trabajo menores de 10 metros cuando los equipos de trabajo se solaparían entre secciones durante las operaciones de arranque y carga.

Entre dos secciones consecutivas en desmonte, el volumen resultante vendrá dado en unidades de metro cúbico en banco, mientras que en el caso de que las secciones extremas sean de terraplenado serán unidades de volumen compactado. Como ya comentamos, la conversión de unas unidades de volumen a otras es esencial a la hora de estudiar la obra y conocer los volúmenes de tierras aprovechables en la excavación para su utilización como material de rellenos.

La tipología de las tierras marca su capacidad para ser empleado como material de relleno. Los trabajos de estabilización de tierras han dado un giro en las técnicas de construcción empleadas y el aprovechamiento de los suelos. Mediante la adición y remoción de los materiales excavados con otras mezclas de áridos o materiales cementosos, se puede conseguir que suelos con bajas prestaciones mecánicas puedan ser constituyentes de la estructura del relleno. La banda de tierra vegetal, que constituye la primera capa del terreno natural objeto de ser excavada (con un espesor de 30 centímetros a un metro) no reúne las características mínimas necesarias para su

empleo en rellenos debido a su contenido en materia orgánica, si bien es cierto que en algunos casos puede mantenerse para favorecer la construcción del arranque del terraplén (caso de lodos y fangos). Así pues, la compensación y el cálculo de volúmenes debe tenerse en cuenta descontando el volumen de material retirado en las labores de desbroce del terreno.

En los tramos en desmonte, el volumen de tierra vegetal retirado a vertedero debe sustraerse del volumen de excavación disponible para su aprovechamiento en la obra. En el caso de secciones en terraplén, este volumen debe aportarse, sumándose al volumen de relleno necesario.

El esponjamiento de las tierras y los requerimientos de la compactación pueden dar lugar a variaciones importante en el volumen de los suelos. El principal objetivo de la cubicación de volúmenes es conocer el balance de tierras disponibles en la obra, además de analizar los puntos de mayor producción y demanda de tierras a lo largo del trazado. El balance de las tierras determina la necesidad o el exceso de material para realizar la explanación, y para ello es importante que la cubicación de volúmenes se realice en las mismas unidades.

4.3 Organización de los cálculos

Conociendo los volúmenes de trabajo en la traza podemos adquirir una idea aproximada de la complejidad de la obra, y dar respuesta a preguntas directamente relacionadas con el plazo y el coste de la obra. El diseño del trazado en base al cual se calcula el proyecto es fundamental a la hora de valorar, de forma aproximada, el coste de ejecución de los trabajos. Es fundamental, por tanto, realizar un estudio exhaustivo de las condiciones existentes en el terreno antes de contratar la ejecución del proyecto, ya que la presencia de suelos expansivos o margas pueden provocar en algunos casos movimientos internos del terreno dificultando enormemente la realización de la obra. En estos casos es conveniente considerar alternativas en el diseño del trazado que justifiquen sus ventajas en términos medioambientales y económicos.

La Hoja de Cálculo de Volúmenes es una herramienta muy práctica que permite realizar el cálculo de volúmenes en la traza de forma ordenada. Consiste en diseñar una tabla donde, en la primera columna incluimos en cada fila los perfiles transversales en que se divide la obra, y los nombramos por el punto de la traza donde se encuentran (p.k.). Si el proyecto cuenta con pocas jorobas, es decir, tramos en desmonte y terraplenado distribuidos uniformemente a lo largo del trazado, la cubicación de secciones iguales puede agruparse, con el objetivo de presentar la información del proyecto de manera global, de manera que podamos adquirir una idea rápida de las características de la obra y del relieve del terreno a lo largo del trazado. Las siguientes columnas definen las áreas de desmonte y terraplenado (en m²), para cada sección respectivamente, el volumen de desmonte disponible (m³B), el volumen de terraplenado (m³C), el volumen de la capa superficial de tierra vegetal en desmonte (m³B), el volumen de tierra vegetal por debajo de terraplenes (m³C), el volumen de excavación disponible descontando el volumen de tierra vegetal (m³B), el volumen de relleno requerido sumando el aporte por la retirada de la capa vegetal (en m³ de volumen compactado), el volumen de relleno requerido expresado en unidades de volumen en banco y la diferencia de volúmenes de excavación y relleno, que marca el déficit o superávit de tierras disponibles para relleno entre cada sección precedente y la anterior. La última columna define la ordenada de masas o el balance acumulado desde el punto que marca origen de la obra hasta el final de trazado. La última columna de la hoja de cálculo de volúmenes no permite conocer la curva que describe el diagrama de masas de la obra.

A continuación, se muestra la hoja de cálculo empleada en el Proyecto de la Variante de las Cabezas para calcular el volumen de suelo tolerable necesario en las zonas de terraplenado a lo largo del trazado. En este caso, la Hoja de Volúmenes, expresada en m³ de volumen esponjado, parte de la situación en la traza tras la retirada de la capa de tierra vegetal. La columna del balance representa el valor de la ordenada de masas en al final de cada tramo. Por último, se introduce una columna “volumen aprovechable” que marca el volumen disponible de material a medida que la obra avanza en la ejecución de los rellenos.

TRONCO. RELLENO DE TERRAPLÉN S. TOLERABLE									
TRAMOS		VOLUMEN DESMONTE (m³)	VOLUMEN APROV. (m³)	VOLUMEN EN RELLENO (m³)	VOLUMEN TERRAPLÉN (m³)	BALANCE DE TIERRAS (m³)		BALANCE ACUM.	VOLUMEN APROVECHABLE (m)
P.K. INICIAL	P.K. FINAL					DEFICIT	SUPERAVIT		
0	60	157,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	156.356,41
60	200	12.701,93	6.986,06	6.986,06	0,02	0,00	6.986,04	6.986,04	156.356,41
200	400	11.184,13	6.710,48	6.710,48	0,00	0,00	6.710,48	13.696,52	156.356,39
400	500	638,69	0,00	0,00	1.253,41	-1.253,41	0,00	12.443,11	156.356,39
500	640	13.813,23	11.050,58	11.050,58	0,01	0,00	11.050,57	23.493,68	155.102,98
640	1.040	355,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23.493,68	155.102,97
1.040	1.440	30.719,96	24.575,97	24.575,97	62,86	0,00	24.513,11	48.006,79	155.102,97
1.440	1.900	12.510,60	0,00	0,00	27,90	-27,90	0,00	47.978,89	155.040,11
1.900	2.340	8,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47.978,89	155.012,21
2.340	2.480	133,07	0,00	0,00	2.379,07	-2.379,07	0,00	45.599,82	155.012,21
2.480	2.880	42.246,02	23.235,31	23.235,31	0,00	0,00	23.235,31	68.835,13	152.633,14
2.880	5.440	9.801,17	0,00	0,00	53.838,60	-53.838,60	0,00	14.996,53	152.633,14
5.440	5.880	46.832,59	37.466,07	37.466,07	0,00	0,00	37.466,07	52.462,60	98.794,54
5.880	6.640	484,84	0,00	0,00	43.019,62	-43.019,62	0,00	9.442,98	98.794,54
6.640	6.960	83,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9.442,98	55.774,92
6.960	7.140	2.304,81	0,00	0,00	0,13	-0,13	-0,13	9.442,85	55.774,92
7.140	7.560	57.914,92	46.331,94	46.331,94	0,00	0,00	46.331,94	55.774,79	55.774,79
7.560	8.000	2.133,77	0,00	0,00	6.291,81	-6.291,81	0,00	49.482,98	55.774,79
8.000	8.440	2.623,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49.482,98	49.482,98
TOTALES		246.648,80	156.356,4	156.356,4	106.873,4	106.810,4	156.293,5		49.482,98

4.4 El Diagrama de Masas y su utilidad

El estudio de los trabajos de compensación de los volúmenes en la traza requiere tiempo. Si bien es cierto que en obras en las que el terreno existente presenta una continuidad, con un número pequeño de jorobas o secciones en desmonte a lo largo del trazado, la planificación de los trabajos desde estos puntos a las zonas de rellenos puede resultar sencilla, es conveniente dedicar cierto tiempo a valorar los rendimientos obtenidos mediante el empleo de métodos constructivos diferentes, las producciones asociadas a combinaciones de equipos dentro de la traza y establecer la organización de los tajos que en menor medida interfiera con el funcionamiento normal de otras vías.

La compensación de desmontes a rellenos suele realizarse entre secciones colindantes, desde las zonas más próximas del desmonte a las más alejadas. Sin embargo, cuando nos encontramos con terrenos que presentan un relieve complejo, con un número elevado de jorobas y zonas de terraplenado discontinuas, el proceso de asignación de volúmenes desde unos puntos a otros puede resultar complejo. El resultado de la asignación abarca un espacio amplio, establece el origen y destino de la asignación (“de dónde a dónde”), define la tipología de las tierras acarreadas y el volumen neto de excavación transportado y especifica el equipo de transporte que se empleará para ello.

En la planificación de los trabajos de movimiento de tierras en obras de caminos, la elección de la maquinaria a emplear se realiza en función de las condiciones de excavabilidad del terreno y de las distancias de transporte entre las zonas de excavación y terraplenado. Estos volúmenes y distancias de transporte se reflejan en los diagramas de masas.

El Diagrama de Masas (DM) nace como una herramienta de planificación de los movimientos de tierras dentro de la obra, desde los puntos de excavación a las zonas de terraplenado. Se trata de un método muy utilizado por

los ingenieros americanos y también en la actualidad en nuestro país. Representa gráficamente el volumen de tierras de excavación disponible a lo largo del trazado y permite establecer rangos de operación para los diferentes equipos de trabajo dentro de la obra, cuantificando los volúmenes de material transportados por cada uno de ellos y definiendo sus distancias medias de transporte.

Como su nombre indica, el DM constituye un gráfico donde se muestra el volumen de excavación acumulado a medida que avanzamos en la compensación en la traza. Permite a simple vista comprender la distribución de volúmenes en la traza, definiendo secciones transversales en desmonte y terraplenado en base a la orientación de la curva, y conocer las necesidades de materiales para acometer la obra.

En el eje de abscisas se marcan los tramos en que se divide la obra, desde el punto kilométrico cero (p.k. 0+000) hasta el final del trazado. El eje de ordenadas representa el valor del volumen disponible en cada punto concreto. Si la curva avanza en sentido ascendente representan secciones transversales en desmonte en el trazado y cuando la curva decrece quiere decir que nos encontramos en un tramo en relleno. Los máximos y mínimos que aparecen en la curva del acumulado se corresponden con los puntos donde el perfil del terreno cambia de desmonte a terraplenado y viceversa. La intersección de la curva con el eje de abscisas indica que, llegados a ese punto, el volumen de desmonte es igual al volumen de relleno y que, si la obra finalizara en ese tramo, la ejecución de los trabajos podría realizarse sin considerar la adquisición de tierras de préstamos ni la retirada de sobrantes fuera de la obra. El valor que toma la curva del diagrama en el punto final establece el resultado de la compensación en la obra, es decir, si el volumen de excavación es suficiente para acometer el terraplenado, y en su caso qué volumen irá a parar a vertederos o si, por el contrario, las necesidades de material son mayores que el volumen de desmonte aprovechable y, por lo tanto, tendremos que recurrir a préstamos para cubrir esta necesidad.

La división del trazado en zonas de trabajo por equipos es esencial para realizar la obra. Una buena organización de los trabajos mejora los rendimientos obtenidos, ya que se evitan interferencias entre trabajos. Además, es importante que el jefe de obra transmita las órdenes a los trabajadores de manera precisa para evitar que se produzcan retrasos o paradas innecesarias en los trabajos.

El DM entra en la selección de los equipos que llevarán a cabo el transporte de material. Lo hace conociendo las distancias económicas de transporte de cada uno de ellos, es decir, la distancia por encima de la cual el rendimiento de la máquina disminuye, traduciéndose en un incremento del coste que no se corresponde con un aumento de la producción. Para la asignación de los equipos se establecen líneas de compensación. Son líneas horizontales que se hacen corresponder con las distancias máximas de transporte en condiciones económicas para alguno de los equipos. Cada línea de compensación define el rango de actuación de un mismo tipo de maquinaria de obra. Las líneas se dibujan sobre la curva del volumen acumulado desde los puntos de excavación a los puntos de relleno. Si la curva está por encima de la línea de compensación, la dirección del transporte es de izquierda a derecha y si está por debajo el transporte debe realizarse de derecha a izquierda. Entre los extremos de una línea de compensación, el volumen de material de desmonte iguala exactamente al volumen requerido para la ejecución de rellenos. La cantidad de material de excavación transportado por los equipos asignados viene determinada por la distancia desde la línea de compensación al máximo o mínimo que dibuja la curva en ese intervalo.

Otra propiedad que caracteriza y justifica el empleo del DM en la planificación de las operaciones de movimiento de tierras a lo largo de la traza es el cálculo de las distancias medias de transporte de los equipos de obra. La distancia media de transporte se puede calcular determinando primero el área encerrada por la línea de compensación y la curva del diagrama de masas y dividiéndola a continuación por el volumen de material que habrá de ser transportado. La distancia media hace referencia a la longitud del trayecto promedio que efectuarán los equipos de trabajo. Este trayecto siempre será menor a la distancia económica del equipo en cuestión y vendrá determinado por el reparto del volumen de desmonte disponible y el volumen de relleno requerido en el intervalo del trazado considerado.

En resumen, el DM es una herramienta muy útil, que proporciona una gran cantidad de información al analista relativa a volúmenes de materiales a transportar, distancias medias de transporte y los equipos que deben emplearse para realizar el trabajo.

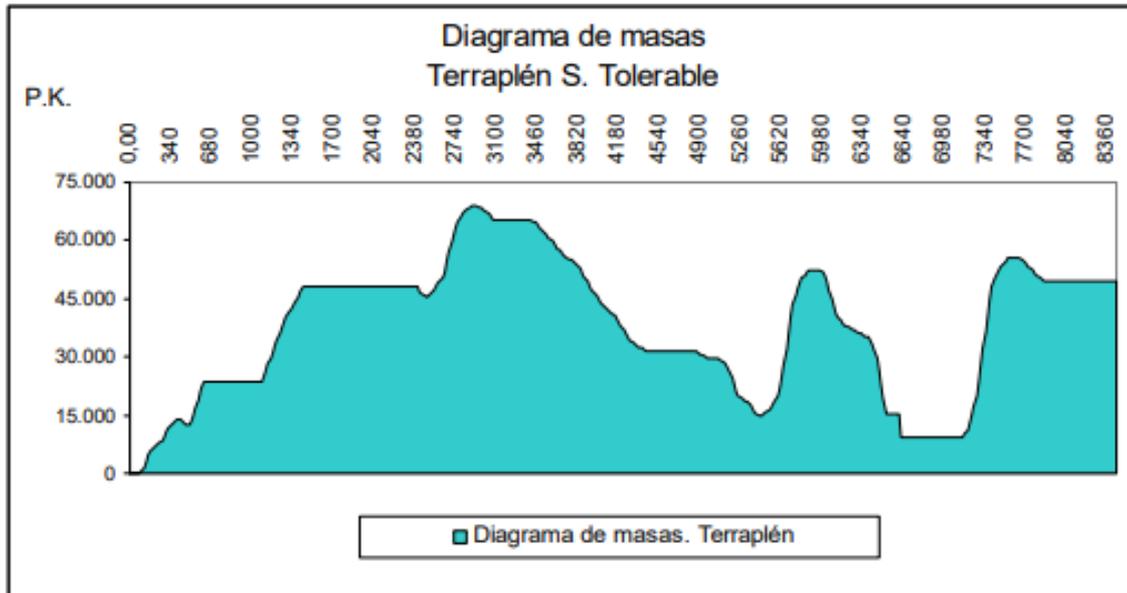


Ilustración 13 – Diagrama de Masas Suelo Tolerable. Variante de las Cabezas

4.5 Otros métodos de estudio de la compensación y de la planificación de los trabajos

El diagrama de masas se ha probado como una herramienta eficaz en la planificación de los trabajos de movimiento de tierras en las obras lineales de caminos. Actualmente sigue empleándose, siguiendo los principios que lo caracterizan. Sin embargo, las nuevas tendencias han dado un giro al estudio de los proyectos de carreteras, que busca la resolución del problema en base a procedimientos computacionales y el contraste de los resultados para optimizar la solución de ejecución de los trabajos que se trasladará a la obra.

Estas nuevas tendencias de planificación de las operaciones de MdT se basan en la aplicación de softwares de programación lineal para dar una solución al problema. La ventaja fundamental de la programación lineal respecto los métodos tradicionalmente empleados es la cantidad de variables y datos asociados al problema, y que se tienen en cuenta para su resolución.

Estos lenguajes de programación presentan un método o codificación específica cuando se trabaja con ellos, y presentan un entorno matemático donde describir y dar solución al problema. De igual modo, estos lenguajes de programación matemática contienen una variedad de “solvers” o solucionadores diferentes que permiten abordar un amplio rango de problemas de distinta naturaleza. Se trata de describir un problema real en un formato que pueda ser interpretado y resuelto por el solver empleado.

Herramientas de programación como Lingo, Python, Gurobi o Gams se han desarrollado enormemente en los últimos años, y lo siguen haciendo, ofreciendo multitud de posibilidades a la hora de analizar y resolver problemas diversos. El entorno gráfico de estos lenguajes se ha potenciado, por las ventajas que aportan al análisis y la comprensión de los resultados. Si bien la codificación del lenguaje difiere de unos a otros, los softwares de programación han evolucionado hacia el trabajo conjunto, permitiendo la comunicación (exportaciones e importaciones) entre ellos.

A continuación, entraremos en más detalle en la explicación de las técnicas de investigación operativa aplicadas al problema de asignación de transportes en las obras de caminos. Explicaremos el modelo que hemos desarrollado en este proyecto y el software de programación lineal en que nos hemos apoyado.

5 APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA AL TRANSPORTE DE TIERRAS EN OBRAS DE CAMINOS

La aplicación de técnicas de programación lineal a la resolución de problemas complejos tiene un gran recorrido desde la segunda mitad del siglo XX. En este punto debemos mencionar los estudios que llevaron a cabo expertos en la construcción de obras de caminos, y que buscaban un método que mejorara la solución que proporcionaba el Diagrama de Masas ante determinadas situaciones de obra. Stark and Nicholls, en 1972, desarrollaron en un primer momento un modelo de programación lineal que definía las asignaciones de materiales dentro de la obra, siendo más tarde desarrollado por Nandgaonkar (1981), Mayer and Stark (1981, 1983) y Easa (1987, 1988). El modelo propuesto por Mayer and Stark aportaba más información al estudio. Como extensiones a modelos anteriores incluyeron la consideración de zonas de préstamo y puntos de vertido, coeficientes de esponjamiento de las tierras y grados de compactación en función del tipo de material. Sin embargo, y como reconocieron Mayer and Stark, el modelo presentaba ciertas limitaciones, al suponer costes unitarios aproximadamente constantes. Easa desarrolló el modelo incorporando costes unitarios variables, siendo la cantidad total de material transportado uno de los factores principales a la hora de considerar variaciones en el coste de los trabajos. Estos modelos buscaban alcanzar una solución de ejecución más eficaz y económica de los trabajos de movimiento de tierras en la obra. Sin embargo, la duración del proyecto no se consideraba, excepto en unos primeros intentos por parte de Shafer (1963). De esta forma la planificación de los trabajos se veía penalizada, pues el resultado obtenido de la aplicación de estas técnicas no garantizaba que efectivamente la obra se ejecutara en plazo. A. K. W. Jayawardane and F. C. Harris (1990) desarrollaron una formulación que incorporaba la duración del proyecto, a la vez que testeaba alternativas de equipos diferentes para completar los trabajos dentro del tiempo objetivo.

A pesar del desarrollo de estas técnicas, su empleo en la planificación de las obras de caminos sigue siendo escaso.

Tras revisar estos planteamientos que pretendían dar solución a los trabajos de ejecución de explanaciones en obras lineales de caminos mediante el uso de técnicas de investigación operativa, proponemos un modelo de fácil interpretación que permite dar solución al problema en situaciones donde confluyen varios tipos de materiales en el trazado, se tienen en cuenta diferentes puntos de préstamos y vertido y diferentes configuraciones de equipos dentro de la obra.

La industria de la construcción está cambiando. La inestabilidad económica, la creciente subida del precio de los materiales o la escasez de personal cualificado en las obras, hace que la optimización de los trabajos con vistas a que la obra pueda realizarse en un coste razonable sea más necesaria que nunca.

El proyecto propone un método basado en la aplicación de técnicas de investigación operativa como alternativa al empleo Diagrama de Masas en la planificación de los trabajos de compensación de tierras en la traza y la asignación de equipos de trabajo para realizarlos.

Los resultados del modelo, en base a su aplicación a una serie de problemas, resultan interesantes. Es importante, no obstante, para poder interpretar de manera correcta los resultados conocer su alcance y las suposiciones que se plantean.

5.1 El modelo utilizado

Planificar el transporte de los materiales dentro de la obra requiere conocer una serie de datos que se resumen en: conocer el trazado de la obra, el perfil del terreno, la cubicación de volúmenes entre secciones transversales, las características geotécnicas de terreno, la ubicación de los puntos de préstamo y vertido, ubicación de los puntos de acceso a la obra y las características de los equipos mecánicos disponibles. De esta forma, podemos definir las matrices de distancias entre diferentes secciones dentro de la obra, las matrices de volúmenes en desmontes y rellenos, y alimentar el modelo con los datos que reflejan los condicionantes y el comportamiento real en la obra.

Mediante el desarrollo de una función objetivo que minimiza los costes derivados del movimiento de tierras en la obra y el establecimiento de un conjunto de restricciones que acotan la cantidad de material que podemos y debemos transportar a lo largo del trazado para completar la explanación damos solución a la compensación de volúmenes en la traza.

El modelo, basado en técnicas de programación lineal con el objetivo de establecer la asignación de volúmenes entre los centros de producción (desmontes) y demanda (rellenos), los transportes a puntos de vertido y los acarreo de material procedente de préstamos a la obra.

Posteriormente se comparan los resultados con los obtenidos con el método del Diagrama de Masas.

El alcance del modelo establece una serie de consideraciones que se nombran a continuación:

- Como ya indicamos en puntos anteriores, partimos de un trazado de la carretera ya dado, es decir, el modelo no entra en la conveniencia del diseño planteado, sino que se limita a optimizar el coste del movimiento de materiales en la traza.
- El objetivo del modelo es minimizar los costes asociados al transporte de materiales en la traza.
- El modelo resuelve la compensación de volúmenes en el trazado, definiendo los transportes de material dentro de la obra, hacia los puntos de vertido y las adquisiciones de material de préstamos. Cuantifica el volumen de material acarreado (medido en m³ esponjados) y establece el equipo que deberá emplearse en el transporte de las tierras.
- El modelo no dimensiona el tamaño óptimo de la flota de equipos de obra. El número de equipos de excavación y, por tanto, las producciones generadas se introducen en el modelo previamente. Sí estima, para equipos de transporte como los camiones y dúmperes, el tamaño de la flota que minimiza el coste unitario del transporte entre dos puntos, es decir, aquel que aprovecha en mayor medida el rendimiento de los equipos de excavación.
- La producción del equipo de excavación limita la producción aguas arriba para los equipos de transporte. La producción de las mototraíllas dependerá de las distancias de transporte en cada caso.
- El modelo no analiza las distancias medias de transporte de los equipos. No obstante, en base a los resultados obtenidos es sencillo calcular estas distancias.
- Tampoco entra a valorar las velocidades de transporte de los equipos, que se asumen correctas, y derivadas un estudio previo de las velocidades a la que podrán operar los equipos en la traza en función de las pendientes y el tipo de suelos en el trazado. Para los acarreo de material dentro de la obra, se considera la velocidad de los equipos en carga y vacío. En el caso de los transportes a zonas de vertido y las adquisiciones de préstamos, se ha estimado desde un punto de vista conservador una misma velocidad en todo el recorrido.
- No se consideran los costes asociados a las operaciones de extendido, nivelación y compactación de las tierras. Tampoco se incluyen los costes asociados al desbroce y retirada de la capa de tierra superficial ni los de estabilización de las tierras excavadas para su empleo como material del relleno.
- El modelo estima la duración de la obra, si bien las asignaciones de material se resuelven en base a los costes asociados al transporte, sin tener en cuenta la duración de los trabajos. Esto es un tema a prestar atención, ya que el inicio de un proyecto siempre viene acompañado de un plazo de ejecución de la obra.
- El modelo considera en primera instancia el aprovechamiento de los materiales aprovechables de la excavación para la construcción de la explanación, recurriendo a tierras de préstamos en el caso de que el

volumen disponible de excavación no sea suficiente para compensar el terraplenado.

El modelo matemático que se ha desarrollado para resolver el problema de asignación de equipos y volúmenes al movimiento de materiales de excavación dentro de la traza es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{MIN } Fobj = & \sum_e \sum_i \sum_j \sum_m x(e, i, j, m) * C(e, i, j) + \sum_p \sum_j \sum_m xp(e, p, j, m) * CP(e, p, j, m) \\ & + \sum_e \sum_i \sum_v \sum_m xv(e, i, v, m) * CV(e, i, v, m) \end{aligned}$$

s. a:

$$\sum_e \sum_j x(e, i, j, m) + \sum_e \sum_v xv(e, i, v, m) == Qd(i, m) \text{ para cada } i \text{ de cada } m$$

$$\sum_e \sum_j x(e, i, j, m) + \sum_p \sum_e xp(e, p, j, m) == Qt(j, m) \quad \forall j, m$$

$$\sum_e \sum_i \sum_m xv(e, i, v, m) \leq Qv(v) \quad \forall v$$

$$\sum_e \sum_i \sum_m xp(e, p, j, m) \leq Qp(p, m) \quad \forall p, m$$

$$\sum_i xv(e, i, v, m) == vvem(e, v, m) \quad \forall e, v, m$$

$$\sum_e vvem(e, v, m) == vvm(v, m) \quad \forall v, m \quad \equiv \quad \sum_e \sum_i xv(e, i, v, m) == vvm(v, m) \quad \forall v, m$$

$$\sum_v vvm(v, m) == vv(m) \quad \forall m \quad \equiv \quad \sum_e \sum_i \sum_v xv(e, i, v, m) == vv(m) \quad \forall m$$

$$\sum_m vv(m) == vtv \quad \equiv \quad \sum_e \sum_i \sum_v \sum_m xv(e, i, v, m) == vtv$$

$$\sum_j xp(e, p, j, m) == vpm(p, m) \quad \forall p, m$$

$$\sum_p vpm(p, m) == vp(m) \quad \forall m \quad \equiv \quad \sum_p \sum_j xp(e, p, j, m) == vp(m) \quad \forall m$$

$$\sum_m vp(m) == vtp \quad \equiv \quad \sum_p \sum_j \sum_m xp(e, p, j, m) == vtp$$

$$\sum_i \sum_j x(e, i, j, m) == vem(e, m) \quad \forall e, m$$

$$\sum_m vem(e, m) == ve(e) \quad \forall e$$

$$\sum_e ve(e) == vado$$

$$vado + vtp + vtv == vmov$$

$$dias(e, m) == \frac{(\sum_i \sum_j x(e, i, j, m) + \sum_i \sum_v xv(e, i, v, m))}{produccion * jorn}$$

$$diasp(e, m) == \frac{\sum_p \sum_j xp(e, p, j, m)}{prodPala * fh * jorn}$$

$$\sum_m dias(e, m) + diasp(e, m) == sumadias(e)$$

$$\sum_e sumadias(e) == plazo$$

$$Xeijm \geq 0 \quad \forall e, i, j, m$$

$$Xeivm \geq 0 \quad \forall e, i, v, m$$

$$Xepjm \geq 0 \quad \forall e, p, j, m$$

Otras restricciones aplicadas al modelo para simular el comportamiento de los equipos que se utilizaron en el Proyecto de La Variante de las Cabezas de San Juan. Con 'e1' y 'e2' refiriéndose a los camiones de 25 y 12 toneladas, que se emplearon en el movimiento de materiales, respectivamente.

$$xp('e2', p, j, m) == 0 \quad \forall p, j, m$$

$$xp('e3', p, j, m) == 0 \quad \forall p, j, m$$

$$xv('e3', i, v, m) == 0 \quad \forall i, v, m$$

$$dist(i, j) \leq deco + CS * Y(i, j) \quad \forall i, j$$

$$\sum_m x('e3', i, j, m) \leq CS * (1 - Y(i, j)) \quad \forall i, j$$

$$dist(i, j) \leq 100 + CS * (1 - s(i, j)) \quad \forall i, j$$

$$dist(i, j) \geq 100 * 1 - s(i, j) \quad \forall i, j$$

$$\sum_m (x('e1', i, j, m) + x('e2', i, j, m)) \leq CS * (1 - s(i, j)) \quad \forall i, j$$

$$balance(m) == CS * a(m) - CI \quad \forall m$$

$$\sum_p \sum_j xp('e1', p, j, m) \leq CS * (1 - a(m)) \quad \forall m$$

$$-balance(m) == CS * z(m) \quad \forall m$$

$$\sum_p \sum_j xp('e1', p, j, m) \leq -balance(m) + CS * 1 - z(m) \quad \forall m$$

$$\sum_j \sum_m x('e1', i, j, m) \leq CS * k(i) \quad \forall i$$

$$\sum_j \sum_m x('e2', i, j, m) + \sum_v \sum_m xv('e2', i, v, m) \leq CS * (1 - k(i)) \quad \forall i$$

$$\sum_j \sum_m x('e2', i, j, m) \leq CS * r(i) \quad \forall i$$

$$\sum_j \sum_m x('e1', i, j, m) + \sum_j \sum_m xv('e1', i, v, m) \leq CS * (1 - r(i)) \quad \forall i$$

$$Y_{ij}, S_{ij}, \alpha, z, k, r \quad \text{binarias}$$

El modelo nace de los estudios planteados por Mayer and Stark, basados en los principios del problema de "transporte". Se posiciona como una herramienta de apoyo a las decisiones durante la fase de estudio y planificación de las operaciones de MdT. Se trata de aportar una solución al problema que se pueda implementar en obra.

A continuación, se explica la estructura del modelo y los datos que es necesario incorporar para que este funcione.

5.1.1 Datos de entrada

- Conjunto de secciones transversales en desmonte i y secciones en terraplén j . Materiales de excavación y ejecución de rellenos m , puntos de vertido v , zonas de préstamos p y equipos de obra disponibles e .
- Costes unitarios de transporte " C_{eijm} ", desde cada sección en excavación i a cada sección en terraplenado j , para cada equipo e y en función del tipo de material acarreado. Engloba los costes de excavación en la sección i , el transporte una distancia d_{ij} (distancia entre los puntos medios de cada sección) y la descarga de tierras en la sección de destino j .
- Costes unitarios " C_{Pepjm} " desde las zonas de préstamos hacia un punto de relleno en la traza, para cada equipo e . Comprende el transporte una distancia dp_j del préstamo p al relleno j , y el canon de préstamo para cada material m . Costes unitarios de transporte de tierras a vertedero C_{Veivm} para cada equipo e . Se calcula en base a la distancia de acarreo div y el canon del vertedero para cada tipo de material.
- Cubicaciones volumen disponible y volumen de material requerido m a lo largo del trazado, para cada

sección en desmonte y rellenos.

- Esponjamiento de las tierras, eficiencia horaria, factores de corrección de la producción, duración de la jornada de trabajo, producción de excavación, capacidad de acarreo de las mototraíllas y canon en préstamos y zonas de vertido por tipo de material.
- Características de los equipos mecánicos: velocidades en carga y vacío, tiempos por maniobras, tiempos de carga y descarga, distancias económicas de transporte y coste horario de la maquinaria.

En obra tendremos mototraíllas autocargables y dúmperes para cubrir mayores distancias. Los camiones se utilizarán en el transporte de tierras procedentes de préstamos y el transporte hacia los puntos de vertido autorizados. El número de mototraíllas viene definido previamente, mientras que el tamaño de la flota de dúmperes, que depende de las producciones de los equipos de excavación, se definirá en función de los resultados que aporta el modelo. Los equipos de trabajo actúan en secciones diferentes dentro del trazado, es decir, no podremos tener dúmperes y mototraíllas trabajando en una misma sección en excavación, aunque sí podrán realizar el transporte de las tierras hacia cualquier sección en terraplenado (siempre que la distancia del recorrido no supere la distancia económica de transporte).

Para los préstamos se establece una capacidad de suministro por tipo de material, mientras que para las zonas de vertido se establece una capacidad máxima de absorción de tierras independientemente de la tipología de las tierras (en los problemas propuestos no se ha contemplado, pero puede darse el caso de que un vertedero solo autorice la descarga de un determinado tipo de tierras). Se establece un canon por adquisición de tierras en préstamos y un canon de vertido, por tipo de material. Se ha tomado una eficiencia horaria generalizada de 50 minutos de trabajo efectivo a la hora, la jornada de trabajo es de ocho horas al día y cinco días a la semana, el esponjamiento supone un incremento del 20% sobre el volumen de las tierras en banco y el coeficiente de paso es de 0.9 metro cúbico compactados por cada metro cúbico en banco trasladado a la zona de terraplenado.

5.1.2 Variables del problema

La compensación de volúmenes a lo largo del trazado se define mediante un conjunto de variables que establecen los movimientos de materiales, con las cuantías de las tierras acarreadas, y los equipos de trabajo que realizan estos transportes.

Así, definimos tres variables globales del modelo: $Xeijm$, $Xepjm$ y $Xivm$, siendo $Xeijm$ las cantidades de material a transportar desde cada zona en desmonte i a cada zona en relleno j (en m³E), para cada material m y equipo e ; $Xeivm$ determina las asignaciones de tierras desde las i zonas en desmonte a cada vertedero v considerado, para cada equipo e y material m ; y $Xepjm$ establece el volumen de material m que se trae desde cada punto de préstamo p a cada zona en terraplenado j .

Estas son las variables que determinan la compensación volumétrica a lo largo de la traza, si bien en el modelo incorpora otras variables que ayudan a interpretar mejor el resultado: $Vvem$ muestra el volumen de material m acarreado por cada equipo e a cada vertedero v ; Vpm define para cada préstamo p el volumen de tierras m traídas de éste; Vtv y Vtp determinan el volumen total de tierras llevadas a vertederos y adquiridas de préstamos, respectivamente; Vem , para cada equipo e representa el volumen de tierras m acarreadas; la variable *plazo* determina la duración estimada de los trabajos, etcétera. Además, se emplean variables auxiliares binarias que posibilitan la correcta resolución del problema.

5.1.3 La Función Objetivo

La función objetivo expresa el coste de los trabajos de excavación y transporte de tierras desde las zonas de excavación a las zonas de relleno, es decir, optimiza el coste de los trabajos de compensación de volúmenes en la obra.

Para cada una de las variables globales que definen el problema ($Xeijm$, $XPpjm$, $XVeivm$) calculamos un coste variable asociado al transporte de las tierras (€/m³E) entre diferentes puntos de la obra. El valor resultando de multiplicar las cuantías de material transportado para cada asignación por su coste asociado devuelve el coste optimizado de ejecución de los trabajos.

Matemáticamente se expresa:

$$Fobj == \sum_e \sum_i \sum_j \sum_m x(e, i, j, m) * C(e, i, j) + \sum_p \sum_j \sum_m xp("e3", p, j, m) * CP("e3", p, j, m) + \sum_e \sum_i \sum_v \sum_m xv(e, i, v, m) * CV(e, i, v, m)$$

5.1.4 Restricciones del Modelo

Se establecen una serie de restricciones que permiten resolver el modelo dentro de los límites que establece la realidad de la obra.

Definimos un conjunto de restricciones de “balance”, que ajustan la compensación de volúmenes a lo largo del trazado, restricciones de aprovechamiento de las tierras disponibles de la excavación, restricciones que definen distancias económicas de transporte y el rango de actuación de los equipos en la obra y calculamos la duración de la obra con el objetivo de coste mínimo de ejecución de los trabajos. Pasamos a describir las restricciones que definen el modelo que resuelve el proyecto real de La Variante de Las Cabezas. Se trata de un proyecto de ejecución de una variante para Las Cabezas de San Juan en la carretera A-471. Con esta variante se perseguía la mitigación de las retenciones ocasionadas por la coincidencia de una travesía urbana con una alta intensidad de tráfico en la carretera A-471, especialmente en determinadas épocas de año. La longitud aproximada de la actuación es de 8.500 metros.

Para la resolución de los problemas propuestos el modelo trabaja igual, pero aplicado a los equipos de trabajo que consideramos en cada caso (dúmperes, mototraíllas y camiones).

La primera restricción se establece entre secciones en desmonte y secciones en terraplenado, de modo que el volumen de excavación disponible de cada material se transportará a puntos de relleno y zonas de sobrantes, dice así:

$$\sum_e \sum_j x(e, i, j, m) + \sum_e \sum_v xv(e, i, v, m) == Qd(i, m) \text{ para cada } i \text{ de cada } m$$

Restricción en los perfiles en terraplenado: el conjunto de tierras adquiridas en préstamos y las transportadas desde diferentes puntos de la excavación deberá satisfacer las necesidades de material en cada sección en terraplenado. Matemáticamente se expresa:

$$\sum_e \sum_j x(e, i, j, m) + \sum_p \sum_e xp(e, p, j, m) == Qt(j, m) \quad \forall j, m$$

Se establecen restricciones para las zonas de sobrantes, que establecen que el volumen de tierras que se llevan a vertederos no puede superar la capacidad máxima establecida para cada uno de ellos.

$$\sum_e \sum_i \sum_m xv(e, i, v, m) \leq Qv(v) \quad \forall v$$

En el caso de los préstamos, actuamos de la misma forma, de modo el volumen de tierras adquiridas en cada préstamo no será mayor que su capacidad de suministro.

$$\sum_e \sum_i \sum_m xp(e, p, j, m) \leq Qp(p, m) \quad \forall p, m$$

Consideramos que el transporte de las tierras a vertederos y desde préstamos lo realizarán los camiones, habilitados para el transporte de carretera. Si se consideraran zonas de préstamo o puntos de vertido dentro del trazado sí podrían considerarse equipos de obra como las mototraíllas y los dúmperes para realizar el acarreo de las tierras desde o hacia estos puntos.

La variable $vvem(e, v, m)$ que nos permite conocer el balance de tierras m llevadas a los distintos vertederos autorizados por cada equipo de transporte disponible.

$$\sum_i xv(e, i, v, m) == vvm(e, v, m) \quad \forall e, v, m$$

La variable $vvm(v, m)$ define el volumen total de tierras m que se llevarán a cada uno de los vertederos v .

$$\sum_e vvm(e, v, m) == vvm(v, m) \quad \forall v, m \quad \equiv \quad \sum_e \sum_i xv(e, i, v, m) == vvm(v, m) \quad \forall v, m$$

La variable $vv(m)$ determina el total de tierras de cada tipo que se destinan a zonas de sobrantes.

$$\sum_v vvm(v, m) == vv(m) \quad \forall m \quad \equiv \quad \sum_e \sum_i \sum_v xv(e, i, v, m) == vv(m) \quad \forall m$$

El volumen total de sobrantes en general se representa mediante la variable vtv .

$$\sum_m vv(m) == vtv \quad \equiv \quad \sum_e \sum_i \sum_v \sum_m xv(e, i, v, m) == vtv$$

La variable $vpm(p, m)$ que referencia al volumen de tierras m que adquirimos de cada préstamo p .

$$\sum_j xp(e, p, j, m) == vpm(p, m) \quad \forall p, m$$

En concreto escribimos la restricción de la siguiente manera para fijar que el transporte lo realicen los camiones, que definimos como el equipo de obra "e3".

$$\sum_j xp("e3", p, j, m) == vpm(p, m) \quad \forall p, m$$

Definimos una variable $vp(m)$ que representa el volumen total de cada material que adquirimos de préstamos.

$$\sum_p vpm(p, m) == vp(m) \quad \forall m \quad \equiv \quad \sum_p \sum_j xp(e, p, j, m) == vp(m) \quad \forall m$$

Las dos formulaciones anteriores son válidas. En el modelo empleamos la primera de ellas con objeto de reducir su tamaño.

El volumen total de tierras adquiridas de puntos de préstamo, independientemente de su tipología lo recoge la variable vtp .

$$\sum_m vp(m) == vtp \quad \equiv \quad \sum_p \sum_j \sum_m xp(e, p, j, m) == vtp$$

La variable $vem(e, m)$ define los metros cúbicos esponjados de cada tipo de material que se asignan a cada equipo disponible para su transporte a zonas de rellenos.

$$\sum_i \sum_j x(e, i, j, m) == vem(e, m) \quad \forall e, m$$

Mediante la variable $ve(e)$ agrupamos el volumen total de tierras que se asigna a cada equipo dentro de la obra.

$$\sum_m vem(e, m) == ve(e) \quad \forall e$$

El volumen total de tierras excavadas que se emplean en la construcción del relleno se recoge en la variable $vado$.

$$\sum_e ve(e) == vado$$

La suma de los volúmenes acarreados dentro de la obra, el volumen de sobrantes que se lleva a vertedero y las tierras que adquirimos de préstamos representan la cubicación total de tierras movidas en el proyecto (*vmov*).

$$vado + vtp + vtv == vmov$$

Una característica importante del modelo es su capacidad para realizar una estimación de la duración de los trabajos de movimiento de tierras. Sin embargo, el modelo no trabaja con distancias medias de transporte como lo hace el Diagrama de Masas, sino que calcula el tiempo invertido en cada transporte y lo repercute en el coste final. La variable *días*(*e*, *m*) se refiere a la duración de los trabajos de compensación de tierras para cada equipo; *diasp*(*e*, *m*) hace referencia al tiempo que se emplea en el transporte de las tierras procedentes de préstamos.

$$dias(e, m) == \frac{(\sum_i \sum_j x(e, i, j, m) + \sum_i \sum_v xv(e, i, v, m))}{produccion * jorn}$$

$$diasp(e, m) == \frac{\sum_p \sum_j xp(e, p, j, m)}{prodPala * fh * jorn}$$

La variable *sumadias*(*e*) define el tiempo total en obra de cada equipo.

$$\sum_m dias(e, m) + diasp(e, m) == sumadias(e)$$

El plazo de la obra se corresponde con la duración de los trabajos de acarreo de tierras en el trazado, incluyendo los tiempos de transporte a vertederos y las adquisiciones desde préstamos. El modelo planteado no optimiza la duración del proyecto. La variable *plazo* representa una estimación de su valor, considerando que se procede al transporte de material a vertederos o a adquirir tierras de préstamos cuando ya se ha realizado la compensación con el material aprovechable de excavación. Esta estimación, por tanto, presenta limitaciones, ya que no tiene en cuenta que estos trabajos se pueden llevar a cabo en paralelo, lo que reduciría los tiempos de forma notable.

$$\sum_e sumadias(e) == plazo$$

En la resolución del problema de la Variante de las Cabezas incluimos restricciones que evitan el empleo de los camiones de 12tn y buldóceres para la adquisición de tierras desde las zonas de préstamos, siendo los camiones de 25tn los que se empleen en estos transportes.

$$xp('e2', p, j, m) == 0 \quad \forall p, j, m$$

$$xp('e3', p, j, m) == 0 \quad \forall p, j, m$$

También evitamos que los buldóceres puedan llevar tierras a vertedero:

$$xv('e3', i, v, m) == 0 \quad \forall i, v, m$$

Los buldóceres deberán respetar su distancia de transporte en condiciones económicas. Esta restricción se modela en dos partes:

$$dist(i, j) \leq deco + CS * Y(i, j) \quad \forall i, j$$

$$\sum_m x('e3', i, j, m) \leq CS * (1 - Y(i, j)) \quad \forall i, j$$

Donde "*deco*" define la distancia económica de transporte, *Y*(*i*, *j*) una variable binaria auxiliar y *CS* una cota superior del modelo.

Para obligar a que la compensación de las tierras en los perfiles a media ladera la realicen los buldóceres definimos la siguiente restricción:

$$si d(i, j) < 100 \quad ent \quad \sum_{i, j, m} x("e1", i, j, m) = 0 \quad y \quad \sum_{i, j, m} x("e2", i, j, m) = 0$$

si $d(i, j) < 100$ ent $s(i, j) = 1$

que es equivalente a escribir:

$$s(i, j) = 1 \text{ si y solo si } d(i, j) < 100 \quad (1)$$

$$\text{si } s(i, j) = 1 \text{ ent } \sum_m x(e1, i, j, m) + x(e2, i, j, m) \leq 0 \quad (2)$$

La restricción, con e1 y e2 refiriéndose a los camiones de 25 y 12 toneladas de capacidad respectivamente, se modela así:

$$(1) \text{ dist}(i, j) \leq 100 + CS * (1 - s(i, j)) \quad \forall i, j$$

$$\text{dist}(i, j) \geq 100 * 1 - s(i, j) \quad \forall i, j$$

$$(2) \sum_m (x(e1', i, j, m) + x(e2', i, j, m)) \leq CS * (1 - s(i, j)) \quad \forall i, j$$

Se definen un conjunto de restricciones que limitan la adquisición de tierras procedentes de préstamos a los casos en los que el material disponible de excavación no sea suficiente en comparación con el volumen necesario para la construcción de la explanación. Se define para cada tipo de material presente en la obra una variable a la que llamamos *balance* que indica el exceso o déficit de tierras disponibles de ese tipo en la obra para compensar las necesidades en los puntos de relleno. Definimos las restricciones de la siguiente forma:

$$\text{balance}(m) == CS * a(m) - CI \quad \forall m$$

$$\sum_p \sum_j xp(e1', p, j, m) \leq CS * (1 - a(m)) \quad \forall m$$

Y para los casos en los que el balance de las tierras sea negativo:

$$-\text{balance}(m) == CS * z(m) \quad \forall m$$

$$\sum_p \sum_j xp(e1', p, j, m) \leq -\text{balance}(m) + CS * 1 - z(m) \quad \forall m$$

Planteamos un conjunto de restricciones que nos ayudan a organizar mejor las zonas de trabajo por equipos: para el transporte de las tierras excavadas en un perfil en desmonte se emplearán camiones de un mismo tipo. Quizás este modo de operar no tenga gran importancia en una obra en la que se emplean camiones o dúmperes para realizar los transportes, pero hemos optado por mantener este modo de trabajo en la obra con vistas a facilitar la organización de los trabajos en la traza.

$$\sum_j \sum_m x(e1', i, j, m) \leq CS * k(i) \quad \forall i$$

$$\sum_j \sum_m x(e2', i, j, m) + \sum_v \sum_m xv(e2', i, v, m) \leq CS * (1 - k(i)) \quad \forall i$$

$$\sum_j \sum_m x(e2', i, j, m) \leq CS * r(i) \quad \forall i$$

$$\sum_j \sum_m x(e1', i, j, m) + \sum_j \sum_m xv(e1', i, v, m) \leq CS * (1 - r(i)) \quad \forall i$$

5.1.4.1 Lógica proposicional

A continuación, se explica en detalle el conjunto de restricciones que emplean técnicas de lógica proposicional para su modelado, y que se han empleado también en la resolución de los problemas sencillos con los que se ha contrastado el funcionamiento del modelo.

La lógica proposicional establece una serie de elementos a la hora de modelar aquellas restricciones que, por su naturaleza, no pueden formularse directamente, y requieren el empleo de variables auxiliares en su formulación. De este modo, forman parte de este grupo aquellas restricciones que limitan su actuación al cumplimiento de una condición preestablecida.

Pertencen a este conjunto de restricciones aquellas que presentan una estructura de la forma: “si (condición) entonces (situación que debe cumplirse)”, “(algo que debe ser cierto) si y sólo si (se cumple una condición)”. Se suelen expresar de la forma: “*si ... ent ...*”, o lo que es lo mismo, “*si ... → ...*”; más restrictiva es la condición “*si y sólo si*”, pues obliga al cumplimiento de la restricción en ambos sentidos, se escribe de la forma “*... si y sólo si ...*”, o lo que es lo mismo “*... ↔ ...*”.

Es frecuente su uso combinado con los operadores lógicos tradicionales AND (Y) y OR (O), que abren el abanico de posibilidades de las restricciones aún más. El modelo desarrollado no trabaja con operadores lógicos, pero sí se hace uso de la lógica proposicional para establecer una serie de restricciones que nos permiten acotar el problema a las condiciones que queremos representar.

Estas restricciones son aquellas que obligan a que se respeten las de distancias económicas de transporte de los equipos (mototraíllas), incentivan el aprovechamiento de las tierras de excavación y tratan de mejorar la organización de los equipos de trabajo en la obra.

5.1.4.1.1 Distancias económicas de transporte

Por lo general, la distancia económica de transporte de las mototraíllas oscila entre los 1000 y 2000 metros (existiendo traíllas capaces de abarcar tramos mayores). Para mayores distancias se emplean los camiones y dúmperes. Hemos querido, por tanto, limitar el uso de estos equipos distancias de acarreo inferiores a estos valores. Así, la restricción establece que, si la distancia de transporte de un punto *i* de desmonte a un punto *j* en terraplenado es mayor que la distancia económica de transporte para el equipo considerado, entonces éstos no podrán realizar el trasvase de tierras entre esos dos puntos.

$$Si \text{ dist}(i, j) > \text{decon} \rightarrow x("e2", i, j, m) = 0$$

Haciendo uso de variables auxiliares binarias podemos dividir la restricción en dos partes. Matemáticamente se expresa:

$$Si \text{ dist}(i, j) > \text{decon} \text{ ent } Y(i, j) = 1 \quad (1)$$

$$Si Y(i, j) = 1 \text{ ent } x("e2", i, j, m) = 0 \quad (2)$$

$$(1) \text{ dist}(i, j) \leq \text{decon} + CS * Y(i, j) \quad \forall i, j$$

$$(2) \sum_m x("e2", i, j, m) \leq CS * (1 - Y(i, j)) \quad \forall i, j$$

La primera restricción obliga a que la distancia de transporte entre tramos para las mototraíllas sea menor que su distancia económica. La variable binaria $Y(i, j)$ tendrá el valor 0 cuando esto sea cierto, y el valor 1 cuando la distancia sea mayor a la distancia económica, haciendo valer la ecuación. La restricción (2) abre la posibilidad a que las mototraíllas (utilizamos “e2” para referirnos a ellas en el modelo) puedan realizar el transporte de suelos entre dichos tramos o la anula. Si $Y(i, j)$ es cero, entonces la variable $x(e2, i, j, m)$, que representa el volumen de tierras *m* transportado por las mototraíllas podrá tomar un valor mayor que cero, ya que la ecuación siempre se cumplirá, al estar este valor por debajo de la cota superior *CS*. Si por el contrario $Y(i, j)$ es igual a 1, el valor a la derecha de la ecuación será cero, obligando a que el volumen transportado “ $x(e2, i, j, m)$ ” sea nulo.

5.1.4.1.2 Transportes a vertedero

Para la resolución de los problemas planteados consideramos que el transporte de las tierras a vertederos, al igual que la adquisición de tierras de préstamos, deban hacerlo los camiones. En ningún caso lo harán los dúmpers. El empleo de mototraíllas únicamente será posible en el caso en que se respete la distancia de transporte en condiciones económicas para estos equipos.

La restricción establece que si la distancia de transporte desde una sección en desmonte a un vertedero es mayor que la distancia económica entonces las mototraíllas no se emplearán en el transporte de las tierras.

$$Si \text{ distv}(i, v) > \text{decon} \rightarrow xv("e2", i, v, m) = 0$$

La formulación planteada es igual al caso anterior, debiendo hacer uso de una nueva variable binaria $L(i, v)$ que, en función del valor que adquiera, condiciona el cumplimiento de las ecuaciones y el valor de la variable $xv("e2", i, v, m)$, que representa el volumen de tierras m acarreadas por las traíllas desde un tramo i en excavación a cada vertedero, en cada caso.

$$Si \text{ distv}(i, v) > \text{decon} \text{ ent } L(i, v) = 1 \quad (1)$$

$$Si L(i, v) = 1 \text{ ent } xv("e2", i, v, m) = 0 \quad (2)$$

$$(1) \text{ distv}(i, v) \leq \text{decon} + CS * L(i, v) \quad \forall i, v$$

$$(2) \sum_m xv("e2", i, v, m) \leq CS * (1 - L(i, v)) \quad \forall i, v$$

5.1.4.1.3 Aprovechamiento de la excavación

Con vistas a modelar el comportamiento real que se sigue en las obras, con relación al aprovechamiento de las tierras de excavación para su uso como material de relleno, se modelan una serie de restricciones para que el modelo sea capaz de restringir la adquisición de materiales procedentes de préstamos al caso en que los volúmenes de excavación no sean suficientes para compensar la necesidad de material en rellenos.

El balance de tierras es la diferencia entre el volumen de excavación disponible y el volumen requerido en zonas de relleno.

$$\text{Balance}(m) = \sum_i Qd(i, m) - \sum_j Qt(j, m) \quad \forall m$$

Se pueden dar dos situaciones: que el balance resulte positivo, es decir, se dispone de material de excavación suficiente para acometer el relleno y, por lo tanto, no será necesario traer tierras de fuera de la obra, debiendo llevarse el material sobrante a las zonas de vertido autorizadas, o viceversa. En este caso será necesario adquirir material procedente de préstamos. A continuación, se modelan matemáticamente estos dos supuestos:

$$\text{Balance} > 0 \text{ ent } \text{tierras a vertedero (A)}$$

$$\text{Balance} < 0 \text{ ent } \text{traer de préstamos (B)}$$

En el primer caso, se establece que el volumen de material "m" procedente de préstamos debe ser igual a cero cuando el balance de tierras es positivo. Incluimos una cota superior "CS" y una variable binaria "α" que obligan a que la variable "xp", que hace referencia al volumen de tierras "m" procedente de préstamos, sea cero.

$$(A) Si \text{Balance} > 0 \text{ ent } xp = 0 \quad \equiv \sum_p \sum_j \sum_m xp("e3", p, j, m) = 0$$

$$si \text{Balance}(m) > 0 \text{ ent } \alpha(m) = 1 \quad (1)$$

$$si \alpha(m) = 1 \text{ ent } xp(m) = 0 \quad (2)$$

$$(1) \text{Balance}(m) \leq CS * \alpha(m) - CI \quad \forall m$$

$$(2) \sum_p \sum_j xp("e3", p, j, m) \leq CS * (1 - \alpha(m)) \quad \forall m$$

Para balances de tierras negativos, se establece que el volumen de tierras “m” procedente de préstamos (xp) debe ser igual al resultado del balance cambiando de signo. Igualmente nos ayudamos de una cota superior y una variable binaria para que la expresión se cumpla.

(B) Si $Balance < 0$ ent $xp = -Balance$

si $Balance(m) < 0$ ent $z(m) = 1$ (1)

si $z(m) = 1$ ent $xp(m) = -Balance(m)$ (2)

(1) $-Balance(m) \leq CS * z(m)$

(2) $\sum_p \sum_j xp(e3,p,j,m) \leq -Balance(m) + CS(1 - z(m)) \forall m$

5.1.4.1.4 Organización de los equipos en obra

Como hemos visto en puntos anteriores, la organización de la obra es un factor determinante en la consecución de los rendimientos deseados. En la fórmula de la producción actúa como un valor (entre cero y uno) que corrige la producción teórica alcanzable. Se consideran obras bien planificadas aquellas que tienen en consideración el estado y la conservación de las pistas y de las zonas de trabajo dentro de la traza, reduciendo las posibilidades de que se produzcan accidentes en la obra y favoreciendo que se alcancen las producciones estimadas. De esta forma, el avance normal de la obra no se verá afectado por situaciones negativas que se puedan dar y que se encuentren dentro de nuestro alcance.

Algunas de estas medidas consisten en establecer y definir de forma clara el alcance de los trabajos, es decir, en qué puntos se realizará la excavación por medio de retroexcavadoras, donde se emplearán los camiones y dúmperes, qué tramos cubrirán las mototraíllas o dónde se encontrarán los accesos a la obra.

En este punto hemos tratado de incorporar esta idea en la medida de lo posible. Introducimos una serie de restricciones que obligan a que en un determinado tramo de excavación no puedan trabajar dúmperes y mototraíllas de manera conjunta. Se les asignará, por tanto, tramos o secciones diferentes, tratando así que el modelo adquiera un comportamiento “normal”.

Planteamos lo siguiente: si la producción en un determinado tramo de la obra del equipo de transporte “e1”, los dúmperes, es mayor que uno, entonces la producción de las mototraíllas (e2) deberá ser igual a cero en dicho tramo. Matemáticamente se expresa:

Si $\sum_j \sum_m x("e1", i, j, m) > 0$ ent $\sum_j \sum_m x("e2", i, j, m) + \sum_v \sum_m xv("e2", i, v, m) = 0 \forall i$

Mediante la introducción de variables auxiliares lógicas hacemos la división de la ecuación en dos partes, y transformamos la expresión a un lenguaje matemático legible por el modelo.

si $\sum_j \sum_m x("e1", i, j, m) > 0$ ent $k(i) = 1$ (1)

si $k(i) = 1$ ent $\sum_j \sum_m x("e2", i, j, m) + \sum_v \sum_m xv("e2", i, v, m) = 0$ (2)

(1) $\sum_j \sum_m x("e1", i, j, m) \leq CS * k(i) \forall i$

(2) $\sum_j \sum_m x("e2", i, j, m) + \sum_v \sum_m xv("e2", i, v, m) \leq CS * (1 - k(i))$

Cuando los dúmperes trabajan en un tramo en excavación “i”, la variable auxiliar k(i) se hace uno, haciendo cero el segundo término de la expresión (2) y obligando a que la producción de las mototraíllas en ese tramo sea también cero. Cuando los dúmperes no se asignan a dicha sección, la variable k(i) toma el valor cero, se cumple por tanto la restricción (1) y abre la mano a que la producción de las traíllas tome un valor positivo, ya que nunca superará el valor de CS, cumpliendo en todo momento la restricción.

De modo equivalente, para las traíllas tenemos:

$$\text{Si } \sum_j \sum_m x("e2", i, j, m) > 0 \text{ ent } \sum_j \sum_m x("e1", i, j, m) + \sum_v \sum_m xv("e1", i, v, m) = 0 \quad \forall i$$

Introduciendo una nueva variable auxiliar $s(i)$ tenemos:

$$\text{si } \sum_j \sum_m x("e2", i, j, m) > 0 \text{ ent } s(i) = 1 \quad (1)$$

$$\text{si } s(i) = 1 \text{ ent } \sum_j \sum_m x("e1", i, j, m) + \sum_v \sum_m xv("e1", i, v, m) = 0 \quad (2)$$

$$(1) \quad \sum_j \sum_m x("e2", i, j, m) \leq CS * s(i) \quad \forall i$$

$$(2) \quad \sum_j \sum_m x("e1", i, j, m) + \sum_v \sum_m xv("e1", i, v, m) \leq CS * (1 - s(i)) \quad \forall i$$

6 APLICACIÓN DEL MODELO AL MdT DE OBRAS CONCRETAS

Con vistas a comprobar la funcionalidad del modelo hemos procedido a la resolución de un conjunto de problemas sencillos de obras de caminos, para finalmente aplicarlo a un proyecto de una obra real. Contrastaremos los resultados que aporta el modelo con los obtenidos para estos mismos problemas mediante la utilización del Diagrama de Masas.

El modelo responde a las preguntas principales que todo contratista debe plantearse antes de estudiar y ofertar una obra: ¿cuánto me cuesta hacer la obra?, ¿cuánto tiempo?, ¿soy competitivo en el precio?, y aporta una solución que permite pensar en la manera en que mejor podrían ejecutarse los trabajos.

Como ya mencionamos, el modelo optimiza el coste de los trabajos de movimiento de tierras durante la explanación. El nivel de detalle abarca la elección de los equipos más adecuados, entre los disponibles por el contratista, para realizar la excavación y el transporte de tierras, y la asignación a los puntos de préstamo y vertido más económica en cada caso.

Como ya mencionamos, el Trabajo no pretende sustituir el uso del DM en la planificación de obras de caminos, sino que nace con la idea de facilitar el análisis en el caso de obras complejas, es decir, obras con trazados complicados y relieves heterogéneos que puedan a su vez incorporar diferentes materiales de excavación o constituyentes del relleno.

Explicaremos cómo funciona Gams, el software que hemos utilizado en el Proyecto, como se ha realizado la transformación de los datos para su introducción en el modelo y las características de los problemas analizados.

6.1 Software empleado

GAMS (General Algebraic Modeling System) es un lenguaje de programación de alto nivel que permite resolver problemas matemáticos complejos aplicando técnicas de modelado avanzadas. Este software de optimización matemática tiene su aplicación en multitud de sectores, como pueden ser la producción de energía, el análisis económico, la planificación de actividades logísticas, las finanzas, el sector de industrial, en cálculos de ingeniería, etcétera.

Como ya mencionamos anteriormente, los lenguajes de programación transforman el código que introducimos en ellos para definir un problema concreto a un formato que puede ser entendido por el solver específico al que llama para resolver el problema. En nuestro caso, para la resolución hacemos uso del solver CPLEX, un solver de alto nivel para problemas de programación lineal (LP) y programación lineal mixta (MLP). El uso libre de CPLEX con Gams está limitado a problemas con menos de mil restricciones y mil variables. Mediante una licencia de trabajo temporal con Gams hemos podido utilizar CPLEX sin limitaciones para resolver los problemas.

Nuestro modelo se desarrolla con vistas a su aplicación en el ámbito de la ingeniería civil, en concreto en el estudio de proyectos de obras lineales. Se plantea con el objetivo de mejorar los métodos actualmente empleados en la planificación de obras de carreteras, que presentan problemas en la resolución de problemas complejos, y dar respuesta a la asignación de materiales desde los puntos de excavación a las zonas de relleno dentro de las obras.

Se trata de un lenguaje potente, que permite una interpretación sencilla del modelo matemático desarrollado y que presenta los resultados de manera estructurada, lo que favorece su interpretación y permite que las soluciones alcanzadas puedan llevarse a cabo.

A la hora de introducir el modelo en GAMS, el lenguaje establece una codificación sencilla. Detectamos diferentes niveles o grupos que permiten introducir el modelo por partes. Estos grupos son: Sets, Table, Parameters, Scalar, Variable, Positive variable, Binary variable, Equations, Model, Solve y Display. Cada uno de ellos se activa al escribir su nombre, pues son palabras reservadas, en la hoja del modelo y se cierra mediante punto y coma (;) una vez se hayan introducido los parámetros correspondientes.

Gams asocia automáticamente al programa en el momento de la descarga una carpeta de archivos llamada “workspace” donde almacena los modelos (.gms) y los ficheros de resultados (.lst) obtenidos. Se trata de una carpeta de trabajo que podemos modificar seleccionando un nuevo directorio una vez abierto el programa.

El comando &TITLE precede al nombre que demos al modelo. En la parte superior de la hoja de resultados que aporta el programa tras la resolución del problema aparece el nombre que hayamos asignado.

```
$TITLE TFM Mvto Tierras
```

Podemos insertar un comentario escribiendo asterisco (*) seguido del comentario o emplear la apertura &oncontext seguido del comentario y cerrando con el comando &offtext.

En SETS se definen los actores del problema, estos son: las secciones en desmante, las zonas de rellenos, los equipos disponibles, los suelos existentes, las zonas de préstamo y los puntos de vertido. A cada uno de ellos se le asigna un nombre y un valor que representa el número de unidades independientes que pertenecen a cada conjunto. Por ejemplo, en el caso de las secciones en desmante se escribiría ‘i ‘Secciones en Desmante’ /i1*i15/, para el caso de que hubiera 15 tramos en excavación y asignásemos la letra “i” para referirnos al grupo. Se utilizaría una línea de código para cada conjunto de actores del modelo y cerraríamos con ‘;’ al final.

Los datos del modelo se introducen como escalares dentro del grupo SCALAR. Aquí escribimos datos como la duración de la jornada de trabajo, el factor de organización de la obra o la eficiencia horaria, empleando una línea de código diferente para cada uno de ellos. Para el factor de eficiencia horaria, por ejemplo, escribiríamos ‘fh ‘eficiencia horaria’ /0,833/’.

Dentro del grupo TABLE se escriben los datos matriciales, que dependen de varios actores al mismo tiempo. Un ejemplo de este tipo de datos son las distancias de transporte desde los tramos en desmante a las zonas de relleno, las distancias a vertederos, distancias a préstamos, volúmenes requeridos para el relleno, volúmenes de excavación, el canon de préstamo o vertido para cada tipo de material, etcétera.

Para su introducción deberemos escribir ‘Table’ seguido del nombre y de los datos matriciales, escribiendo punto y coma al final. Para definir las distancias de acarreo de las zonas de excavación “i” a zonas de relleno “j” escribiríamos:

```
Table dist (i,j) ‘distancias de desmante i a relleno j’
```

	j1	j2	j3	j4
i1	300	400	500	600
i2	200	300	400	500
i3	100	200	300	400;

En el grupo PARAMETER introducimos los datos que dependen de un único concepto, como puede ser la velocidad de los equipos. Por ejemplo, para definir la velocidad en carga de los equipos de transporte escribimos: Parameter vida(e) ‘velocidad en carga km/h’ /e1 25, e2 24, e3 30/;, con “e1” haciendo referencia a los dúmperes, “e2” a las mototraíllas y “e3” a los camiones. También se incluyen en este grupo datos del modelo que se calculan a partir de otros datos conocido. Un ejemplo sería el cálculo del tiempo de ciclo de trabajo:

```
Parameter Tc(e,i,j) ‘Tiempo de ciclo de i a j’;
```

```
Tc(e,i,j)=tcarga(e)+tdesc(e)+dist(i,j)*(60/1000)*(1/vida(e)+1/vret(e));
```

En este caso, la formulación del lenguaje obliga a escribir “;” al final de cada una de las líneas de código.

En el grupo VARIABLE se definen las variables de cálculo del modelo. En nuestro problema alguna de estas hacen referencia a los volúmenes acarreados dentro de la obra, los volúmenes de sobrantes, las adquisiciones de préstamos, la duración de la obra, etcétera. Por ejemplo, para la variable x(e,i,j,m) que representa el volumen de material “m” acarreado por el equipo “e” desde la sección “i” en desmante al relleno “j”, se escribiría:

```
x(e,i,j,m)    `vol.Tierras de excavación i a relleno j en equipo e'
```

Una vez introducidas cada una de las variables del modelo, se cierra con “;”.

En los grupos POSITIVE VARIABLE y BINARY VARIABLE definimos qué variables son continuas (valor mayor que cero) y cuáles binarias, es decir, toman un valor de 0 o 1 en cada caso. Para la variable continua “x” y la variable binaria “Y” quedaría:

```
Positive variables x;
```

```
Binary variables Y;
```

El grupo EQUATIONS se definen las restricciones del modelo. En un primer momento se nombran cada una de ellas para después proceder a su definición matemática. La forma de nombrar las ecuaciones consiste en asignarles un nombre, seguido (no es necesario, pero ayuda a la comprensión del modelo) de la explicación de la restricción. Un ejemplo sería la ecuación que regula el balance de las tierras de excavación. Dice así:

```
E_volD(i,m)    `satisface el balance de excavación en i'
```

```
E_volD(i,m)..    sum((e,j),x(e,i,j,m))+sum((e,v),xv(e,i,v,m))=e=QD(i,m);
```

La restricción establece que la suma del volumen de excavación “m” en el desmote “i” que se transporta a zonas de relleno y/o que se lleva a vertederos debe ser igual al volumen de desmote de dicho material en el tramo “i”. Debe escribirse “;” al final de la expresión.

Una vez hemos terminado de introducir el modelo podemos proceder a su compilación

El comando MODEL prepara al programa antes de proceder a su resolución. Se escribe “Model” seguido del nombre que asignamos al modelo y se indican las variables que participarán en el proceso de compilación.

```
Model Mvto_tierras /all/;
```

El comando SOLVE establece tipo de problema de optimización y el método de resolución (minimizar o maximizar) para la función objetivo del problema. En nuestro caso, resolvemos mediante programación lineal entera (“Mixed Integer Programming”). Se escribe “Solve” seguido del nombre asignado al modelo, indicando el tipo de problema de optimización que estamos tratando y el nombre de la función objetivo.

```
Solve Mvto_tierras using MIP minimizing Fobj;
```

Finalmente, mediante DISPLAY seleccionamos las variables que deseamos ver en pantalla al terminar el proceso de compilación del modelo.

```
Display x.l, xp.l, xv.l, vado.l, plazo.l;
```

Una vez hemos introducido todas las partes del modelo procedemos a resolverlo.

6.1.1 Interfaz con Excel

Uno de los motivos que nos condujeron al trabajo con GAMS es su capacidad de comunicación y trabajo con otras herramientas informáticas. La introducción de los datos en el modelo puede ser algo tediosa en algunos casos. Por ello, automatizar la introducción de datos en el modelo puede resultar beneficioso cuando estos datos puedan ser objeto de cambios, o cuando se quiera analizar escenarios diferentes con diferentes equipos p tipo de suelos. Así, Gams aporta mucha comodidad en la lectura de datos. En nuestro caso almacenamos en Excel los datos de los problemas para, de ahí, empleando la formulación que establece Gams para ello, trasladarlos al modelo.

En este caso, los grupos que establece Gams se mantienen, lo único que cambia es la introducción de los datos del modelo. Para habilitar la lectura de la hoja de cálculo que contiene los datos del problema debemos escribir el comando \$onEcho > HowToRead.txt. Aquí llamamos a todos los datos asociados al modelo. Los datos tipo “set”, como el número de secciones en desmote de la obra o las zonas de vertido consideradas se llaman escribiendo: dSet=i rng=B27 rdim=1. Se escribe “dSet” seguido del nombre dado, mientras que “rng” define su posición en la hoja de cálculo. Los datos de tipo “parameter” y “scalar” se introducen de manera similar: par=dist rng=B26 rdim=1 cdim=1; “rdim=1” indica que los datos se leen en una misma columna, “cdim=1” indica que están contenido en una misma fila y para la lectura de matrices debemos escribir “rdim=1 cdim=1”. Para los escalares se escribe “dim=0”. Al finalizar la llamada de datos se cierra mediante \$offEcho.

Quedaría así:

```
$onEcho > HowToRead.txt
dSet=i rng=B27 rdim=1
par=dist rng=B26 rdim=1 cdim=1
par=fh rng=N50 dim=0
$offEcho
```

A continuación, se escribe:

```
$call gdxrw Datos_TFM.xlsx @HowToRead.txt
$gdxin Datos_TFM.gdx
```

El comando `$call gdxrw` llama al archivo Excel de nombre “Datos_TFM”, lee los datos contenidos en la hoja y los almacena en el archivo Gams “.gdx” con nombre “Datos_TFM” mediante `$gdxin`. Este fichero almacena todos los datos que llegan al modelo y debe revisarse para comprobar que la lectura se está llevando a cabo correctamente.

Dentro de los grupos SET, PARAMETER y SCALAR ahora definimos solo los nombres asignados a las variables:

```
set
i(*) 'Secciones en Desmante'
j(*) 'Secciones en Relleno'
$load i j
display i,j;
Parameter
dist(i,j) 'distancias de excavación a relleno'
distV(i,v) 'distancias de excavación a vertedero'
Scalar
fh 'eficiencia horaria'
$load dist distV fh
display dist, distV;
$gdxin
```

Es importante escribir el comando `$load` para que el modelo cargue los datos contenidos en el archivo .gdx que contiene los datos obtenidos de Excel. El comando “display” nos permite visualizar en el fichero de resultados el valor que adquieren los parámetros del modelo.

Para concluir el proceso de lectura de datos desde una hoja de cálculo volvemos a escribir el comando `$gdxin`.

Los parámetros que se calculan en base a los datos del modelo se introducen en el modelo de la misma forma. Los grupos VARIABLE Y EQUATIONS se completan mediante la escritura de las variables y ecuaciones del modelo con la misma formulación que en el caso anterior.

Para finalizar llamamos a los grupos Model, Solve y Display.

```
Model Mvto_tierras /all/;
Solve Mvto_tierras using MIP minimizing Fobj;
Display x.l, xp.l, xv.l;
execute_unload 'Sol_TFM.gdx', x.l xp.l xv.l;
```

El comando “execute_unload” guarda el valor obtenido para las variables del modelo en un nuevo archivo. gdx de nombre Sol_TFM. Los archivos generados se almacenan en el directorio de trabajo preestablecido de nombre “workspace”.

Gams nos permite realizar el proceso inverso de enviar a un fichero Excel los resultados del modelo. Se formula de la siguiente manera:

```
*execute 'gdxrw Sol_TFM.gdx o=Datos_TFM.xlsx var=xp.l rng=Hoja2!A1';
```

El modelo exporta al fichero Excel “Datos_TFM.xlsx los resultados almacenados en Sol_TFM.gdx y los guarda, en este caso en la Hoja2 del libro, en la casilla A1.

Sin embargo, la exportación no es muy útil, ya que ralentiza la resolución del modelo. Además, el fichero de resultados nos permite extraer los resultados obtenidos (mediante copiar y pegar) y adaptarlos al formato que

queramos de forma sencilla.

6.2 Preparación de los datos

Hoy en día existe una gran variedad de programas informáticos de modelado, diseño, representación y cálculo con aplicación directa en la ingeniería de caminos. Estos softwares, muy potentes, trabajan sobre modelos tridimensionales del terreno en que se llevará a cabo el proyecto y aportan una gran cantidad de información relacionada con el encaje que tendrá la obra en el terreno existente, los volúmenes de excavación y terraplén necesarios para acometer los trabajos de explanación y la representación gráfica de la obra. Uno de los más utilizados actualmente es el programa Civil 3D de Autodesk. Las tablas de datos generadas por estos programas son de gran utilidad en el análisis y planificación de un proyecto y, en nuestro caso, para recoger los datos que queremos incorporar al modelo (cubicaciones de volúmenes entre secciones transversales, matrices de distancias, etc.).

En los problemas resueltos en el Trabajo, obtenemos los datos directamente de la información que aporta el perfil longitudinal del terreno o, en su caso el Diagrama de Masas. Esto es complicado o puede resultar muy tedioso en el caso de proyectos de caminos reales. Para la resolución del proyecto real de la Variante de las Cabezas contamos con los datos de las cubicaciones de volúmenes de excavación y relleno lo largo del trazado.

El esquema de trabajo que hemos seguido para la resolución de los problemas propuestos en el Proyecto es el siguiente: una vez conocemos las principales características y condicionantes que definen el proyecto, grabamos los datos del problema en una hoja de cálculo en Excel. A continuación, durante la compilación del problema en Gams, el modelo lee los datos guardados en la hoja de cálculo indicada y aporta una solución al problema.

Empleamos GAMS principalmente por la claridad en la codificación del lenguaje, su capacidad en la resolución de problemas complejos y la existencia de una interfaz sencilla de comunicación con Excel. La comunicación directa entre Gams y Excel permite una lectura rápida de los datos del problema, y aporta flexibilidad para poder adaptar el modelo a diferentes configuraciones de materiales y equipos de trabajo.

6.2.1.1 Introducción de los datos

La resolución de un problema de planificación de las operaciones de movimiento de tierras en una obra de carreteras requiere de la consideración de un gran volumen de datos que garanticen la correcta representación del problema en estudio. Es fundamental definir de manera correcta estos datos de partida, pues el modelo es susceptible de presentar variaciones importantes en la resolución ante errores aparentemente poco importantes. En nuestro caso particular, y para cada problema a tratar, hemos introducido en una hoja de cálculo los datos representativos de volúmenes existentes, distancias de transporte, equipos disponibles y condicionantes a la producción.

6.2.1.2 Volúmenes existentes

El punto de partida es el comienzo del trazado de la carretera, el punto kilométrico 0+000, a partir de ahí se cuantifican a lo largo de la traza, para cada una de las secciones en terraplén o desmonte el volumen de tierras de relleno, cuando la rasante de la explanada está por encima del terreno natural, volúmenes de excavación, cuando la rasante está por debajo del terreno existente, y ambos volúmenes en secciones a media ladera (tramos que combinan desmonte y relleno).

De esta forma, para los puntos de excavación, se establece una matriz de volúmenes de desmonte disponibles para cada tipo de material. Procedemos de la misma forma implementando una matriz de volúmenes de relleno requeridos para cada tramo en relleno y tipo de material.

Para las zonas de vertido definimos una matriz de capacidad de absorción de sobrantes (en función de la tipología de las tierras o una limitación de vertido general), y para los préstamos procedemos de la misma forma, definiendo una matriz que representa el volumen máximo de cada material disponible en cada uno de los préstamos considerados en proyecto.

El PG3 (Pliego General de Carreteras) establece una clasificación de los suelos en función de sus características. Estudia la tipología de las tierras, su granulometría, propiedades mecánicas, plasticidad del terreno, etcétera. De esta manera, los materiales se clasifican en Suelos Seleccionados (cuatro tipos), Suelos Adecuados, Suelos Tolerables, Suelos Marginales o Inadecuados, Suelos Estabilizados (tres tipos), Zahorras, Pedraplén, Todounos y Otros (se establecen tres tipos, y permiten acoger cualquier material no especificado en los grupos anteriores).

Es necesario contar con la información aportada por el estudio geotécnico de la zona, ya que ofrecerá información relevante acerca de las características de los materiales presentes en excavación, comprobación de la adecuación de las tierras presentes en los puntos de préstamo y el volumen de material que se podrá extraer de ellos, capacidades en las zonas de sobrantes, nivel freático, esponjamiento y densidad del terreno, coeficientes de paso, etc.

6.2.1.3 Distancias de transporte

La longitud del trazado en una obra lineal es un reflejo claro del volumen o, mejor dicho, de la dimensión del proyecto. Al igual que la tipología de las tierras presentes en el terreno, influye de forma clara en el precio por metro cúbico de relleno ejecutado. Este precio, como ya comentamos anteriormente, se desglosa en los costes por metro cúbico en banco excavado, costes de transporte de las tierras esponjadas y coste por metro cúbico compactado (se les aplican las transformaciones necesarias para expresarlo en la unidad compactada).

El precio de excavación aplicado a un determinado suelo aumenta o disminuye en función de un menor o mayor índice de excavabilidad de las tierras, respectivamente. El índice de excavabilidad se refiere a la resistencia que oponen las tierras a ser excavadas. Si nos encontráramos con un suelo de roca dura, cuyo índice de excavabilidad es muy bajo, probablemente hubiera que recurrir a la voladura para la remoción de las tierras, por la dificultad que presentan a ser excavadas, o a un escarificado del terreno previo a la excavación. Un bajo índice de excavabilidad deriva, por lo general, en rendimientos de excavación muy bajos, incrementando los costes, a los que se añaden costes de mantenimiento de los equipos y recambio de piezas adicionales, pues la maquinaria sufre más en estas condiciones. En otros casos el contratista puede optar por el empleo de maquinaria de tara mayor, lo que se traduce en un esfuerzo económico importante por parte del constructor, pues suelen ser equipos especializados y de difícil adquisición en muchos casos, que requieren de mano de obra cualificada.

La distancia de transporte de las tierras entre los distintos tramos de la obra repercute en la duración de los trabajos de la obra y, en consecuencia, en su coste final. El desglose de la partida de movimiento de tierras se compone del coste horario del equipo de trabajo, el coste diario del operario, los costes de combustibles y costos imputados por recambio de piezas (neumáticos, por ejemplo) y labores de mantenimiento. Los rendimientos de transporte (en horas por metro cúbico de tierras transportado) para cada tipo de suelo, que dependen directamente de las distancias medias de transporte de los equipos en obra, determinan el coste final de transporte del material.

El punto kilométrico PK 0+000 representa el origen de la traza. A partir de este punto se definen las distancias desde cada uno de los tramos i en desmonte a cada uno de los tramos j en terraplén (distancias entre centros de secciones), definiendo así una matriz de distancias $dist(i, j)$ donde las zonas del perfil en excavación se sitúan en las filas y en las columnas los puntos de relleno.

Para las distancias desde los puntos en excavación a las zonas de sobrante se procede de igual manera, definiendo una matriz de distancias a vertederos $dist(i, v)$ (centros de consumo) que se representa de igual manera, con los puntos i de desmonte en las filas y los vertederos v considerados en las columnas.

También se formula una matriz de distancias desde préstamos a zonas de relleno $dist(p, j)$, considerando los préstamos p como centros de producción (aporte de tierras). Se muestran los préstamos en las filas y los puntos de relleno en las columnas.

6.2.1.4 Equipos de trabajo

Conocer la elección de los equipos que se emplearán en el proyecto, y definirlos de forma clara en los datos del modelo es muy importante. En la hoja de datos se definen los equipos seleccionados por el contratista para su puesta en obra, a los que nombramos con la letra e . Para cada uno de ellos se establece su coste diario, capacidad de carga o transporte, velocidades de acarreo y en vacío, tiempos de carga, descarga y pérdidas por esperas y maniobras.

Con estos datos, el modelo realiza un cálculo de los tiempos de ciclo (carga, transporte, descarga y vuelta al punto de partida) y, posteriormente, procede al cálculo de los rendimientos de transporte (producciones).

Los datos de los equipos se definen como matrices de una única columna para cada concepto, para su correcta interpretación en el modelo de optimización.

Es importante mencionar que, de esta forma, podemos resolver el modelo con diferentes configuraciones de los equipos llevados a obra, adquiriéndose así una visión más amplia tanto de los resultados económicos como de la organización de los tajos en función de la configuración adoptada. Esta característica ofrece una gran ventaja al constructor a la hora de seleccionar los equipos de trabajo, pues simplemente eliminando o añadiendo al modelo las filas de código que leen los datos de uno u otro equipo podemos plantear diferentes escenarios de trabajo, resolverlos y realizar una comparación y análisis de los resultados que aporta el modelo de optimización.

6.2.1.5 Optimización de la producción

Otros datos a tener en cuenta, que repercuten directamente en los rendimientos obtenidos y que, en la mayoría de los casos, se conocen de antemano antes de su introducción en el modelo, son la duración de la jornada de trabajo en la zona del proyecto, factores de eficiencia horaria, factores de incentivos a la producción, factor de llenado, distancias económicas de los equipos o el número de mototraíllas en obra.

En España, la jornada de trabajo estipulada es de 8 horas diarias, los factores de eficiencia se introducen en forma de escalares en el modelo, con un valor, por lo general, menor a 1 y actúan como una representación del rendimiento obtenido. Cuando hablamos de factor de eficiencia horaria, hacemos referencia a los minutos realmente aprovechado por cada hora de trabajo real. Por lo general, suele rondar entre 45 o 50 minutos de tiempo de trabajo efectivo por cada hora de trabajo.

Sabemos que el volumen de tierras que puede transportar un camión dependerá del volumen de la caja, de su carga máxima permitida y de la tipología de las tierras acarreadas. Así, en función de la granulometría de las tierras, de su densidad seca y húmeda, podría ser conveniente aplicar un factor de llenado que reproduzca de manera adecuada la ejecución de los trabajos y los rendimientos alcanzados.

Factor de incentivo a la producción se refiere a ‘recompensas’ que el constructor establece para sus trabajadores en situaciones en las que el flujo de trabajo alcanzado garantice la buena ejecución, en calidad y plazo de los trabajos, en forma de días de descanso, pago de horas extras considerablemente por encima del coste hora normal, etcétera. De esta forma, el contratista se asegura la certificación de los trabajos a final de mes, que suele hacerse por tajo realmente ejecutado en obra, y los trabajadores están más implicados.

La experiencia en el sector junto con la aplicación del sentido común son los mejores aliados a la hora de considerar estos factores. Sabemos que, en días de lluvia, no se aconseja realizar trabajos de hormigonado o compactación de tierras, de manera que es importante adelantarnos a estas situaciones para, replanificando la jornada de trabajo, intentar acometer aquellos tajos que permitan avanzar con la obra (aunque no siempre se pueda hacer y determinadas situaciones ambientales impliquen demora en los trabajos y retrasos en la obra).

6.3 Problemas de estudio

Los problemas propuestos para el estudio consisten en un conjunto de ejercicios de examen de movimiento de tierras del MII de la Universidad de Sevilla.

La resolución de los problemas abarca la planificación del movimiento de tierras longitudinal entre secciones de desmonte y secciones de terraplenado, indicando los segmentos de la traza en los que emplearía cada uno de los equipos disponibles, y la dirección de acarreo en cada caso. En caso de ser necesario, determina el volumen de tierras que será necesario traer de préstamos o llevar a vertederos. Calculamos el coste asociado a las operaciones de carga y acarreo del material y se presenta una estimación de la duración de las obras.

A continuación, especificamos las situaciones asumidas para la resolución de los problemas:

- Los problemas son independientes unos de otros, es decir, la longitud de la explanación cambia de unos a

- otros, también la curva de la ordenada de masas y el perfil longitudinal en cada caso. Otros valores, como el espesor de la capa de tierra vegetal, el esponjamiento de las tierras o el coeficiente de paso también varían
- No se consideran los costes de desbroce del terreno y estabilización de materiales. Tampoco el transporte de la tierra vegetal a vertedero u otros puntos de la obra.
 - Fijamos secciones transversales cada 100 metros.
 - Se considera un único tipo de material para realizar la compensación.
 - Conocemos la distribución de volúmenes en la traza y las distancias a préstamos y vertederos.
 - Los volúmenes se introducen en unidades de volumen esponjado (m3E) y los resultados del modelo se expresan en las mismas unidades.
 - Los préstamos y vertederos tienen capacidad ilimitada. Aunque el modelo permite limitar la capacidad de aporte o absorción de tierras en los casos en que se consideren puntos de préstamo y vertido en las inmediaciones del trazado.
 - No consideramos canon en préstamos y vertederos.
 - No se consideran secciones a media ladera
 - Consideramos la presencia de mototraíllas y una flota de dúmperes para el acarreo de los materiales dentro de la traza, y camiones para el transporte de tierras a vertedero y la adquisición de material de préstamos. Se considera que hay dos mototraíllas trabajando en la obra. Tanto los dúmperes como los camiones trabajan en paralelo con una retroexcavadora CAT 365 encargada la excavación del terreno y la carga de los equipos. El rendimiento del equipo de excavación limita la producción aguas arriba.

El problema de carreteras real propuesto consiste en el proyecto de la Variante de las Cabezas de San Juan en la A-471. El tramo de intervención presenta una longitud de 8,5 km.

El modelado del problema considera únicamente los trabajos de ejecución de la explanada, dejando fuera del alcance los trabajos de construcción de la capa de firme. Tampoco se considera el coste de los trabajos de desbroce de la capa de tierra vegetal y su transporte a vertedero u otros puntos de la obra. El cimiento del firme lo constituyen, prácticamente en su totalidad, suelos seleccionados procedentes de préstamos, y en la construcción del firme se utilizan mezclas asfálticas de igual procedencia, por este motivo su incorporación al modelo no tiene tanto interés.

En la obra confluyen tres tipos de materiales diferentes: el suelo de excavación se clasifica como suelo tolerable o marginal en función de sus propiedades; para rellenos se emplean suelos adecuados y/o tolerables. Los suelos marginales se llevan a vertederos. En la construcción de los caminos de servicio se emplean suelos tolerables, seleccionados y zahorras.

Como equipos de acarreo contamos con camiones bañera de 25tn, camiones basculantes de 12tn y tractores sobre orugas (buldócer). Para las operaciones de excavación y carga de las tierras se emplean tractores y cargadoras, respectivamente. La compensación de las secciones a media ladera la realizan los bulldóceres. Únicamente el camión de 25tn se emplea para traer tierras de préstamos. El transporte de tierras a vertedero se destina a los camiones. Conocemos los costes horarios y las características técnicas de estos equipos.

En este proyecto se utilizaron tractores de cadenas para realizar la excavación. El desarrollo actual de las excavadoras hidráulicas es tal, en su fuerza de arranque, que están desplazando al tractor de cadenas en trabajos de excavación. Los primeros se utilizan sobre todo cuando la excavación es en roca y es necesario un escarificado previo del terreno.

Se analizan tres puntos de préstamo autorizados: Cantera Lebrija “Cerro Benito” para la adquisición de suelos clasificados como tolerables, Cantera El Cuervo “RIVE” para suelos adecuados y Áridos Villamartín para zahorras. Sus distancias a la obra son de 8,5, 19 y 40 kilómetros, respectivamente. Existe un único punto de vertido autorizado en el municipio donde se encuentra la obra, el vertedero municipal del Caño Palmilla, ubicado a 3,6 km del punto de acceso a la obra. El punto kilométrico de acceso a la obra se sitúa en el p.k. 7+500. Conocemos el canon de material que se establece en préstamos y vertederos, y sus limitaciones para servir a la obra.

El modelado del problema lo realizamos en dos partes, separando, por un lado, los trabajos de compensación en el tronco de la carretera y, por otro, el balance de tierras en los caminos de servicio.

Se trata de un proyecto con un volumen de excavación total de 418.354 m³ esponjados en el tronco de la carretera (217.029 m³E de suelos tolerables y 201.325 m³E de marginales). En los trabajos de terraplenado en el tronco tenemos necesidades por valor de 367.137 m³E (248.412 m³E de suelo tolerable y 118.725 m³E de suelo adecuado). En los caminos de servicio tenemos una necesidad de material en rellenos de 33.502 m³E de suelo tolerable, 23.327,07 m³E de suelo seleccionado y 16.746,85 m³E de zahorras, y un desmonte de 5.700,52 m³E de material sobrante. Se comprueba, por tanto, que hay un déficit de desmonte aprovechable de 64.885,28 m³E de suelo tolerable. El volumen de material de desbroce es 163.760,40 m³E.

Nos encontramos con 22 perfiles transversales en desmonte, 26 en relleno y 37 secciones a media ladera a lo largo del trazado.

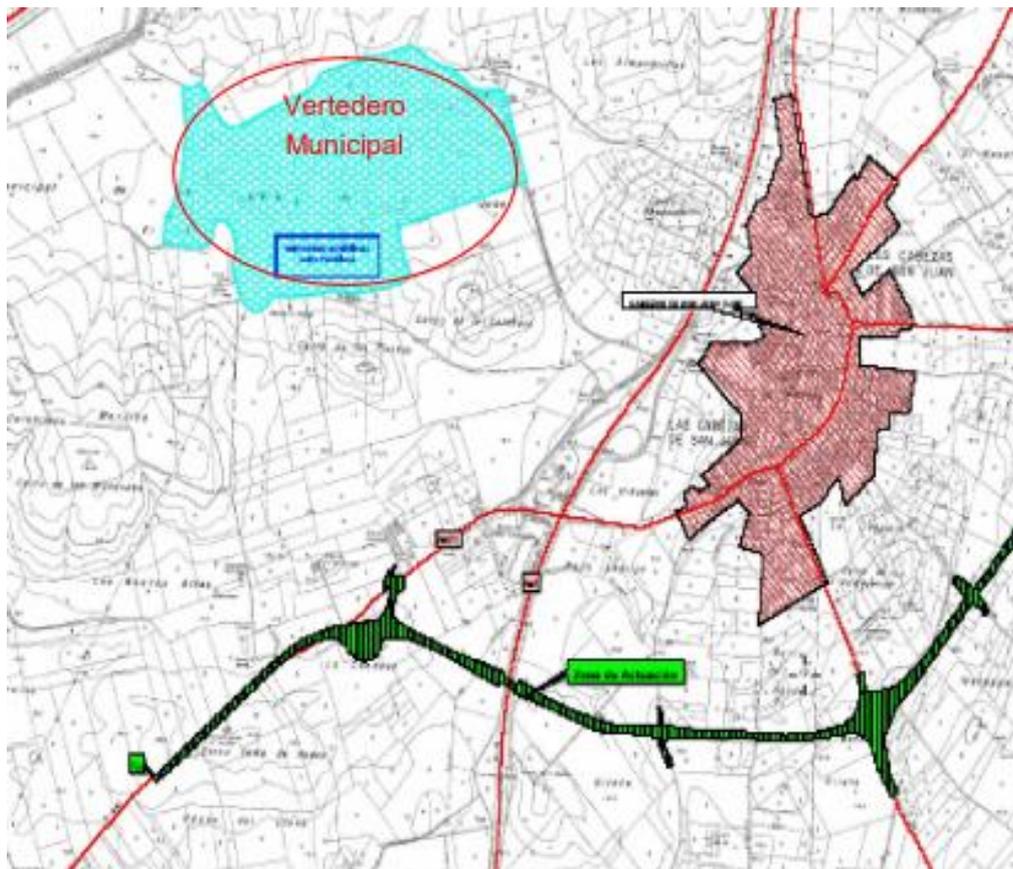


Ilustración 14 – Ubicación del vertedero municipal del Caño Palmilla. Variante de las Cabezas

6.3.1 Resultados obtenidos y comparación con el Diagrama de Masas

Llegados a este punto, se presentan los resultados que aporta el Modelo en relación a los costes y el plazo de ejecución de los trabajos de compensación de volúmenes en el trazado.

Debemos recordar que el objetivo que se pretende con el desarrollo de este modelo de programación es que pueda servir como herramienta de soporte en la planificación de las obras. Hay que recordar también que los números son números, y no será hasta que hayamos probado en obra las soluciones de planificación que aporta el Modelo, cuando podremos entrar a valorar realmente sus resultados de aplicación.

No obstante, y teniendo en cuenta estas cuestiones, el modelo planteado trata de ceñirse en la medida de lo posible a las situaciones de obra que se plantean en la realidad, por lo que los resultados obtenidos deben trasladar confianza en este sentido.

Dicho esto, los resultados obtenidos, en relación con el coste asociado a la asignación de equipos y el transporte

de materiales en la obra, con el Modelo mejoran en todos los casos al resultado económico que sugiere el empleo del Diagrama de Masas. No obstante, los plazos de duración de las obras presentan inconsistencia cuando se comparan con el DM.

A continuación, se analizan los resultados obtenidos con el Modelo al problema de asignaciones de equipos y materiales en la traza para los problemas propuestos 2, 3 y 7 que, al igual que el resto de los problemas, representan obras de caminos sencillas de las que podemos conocer de forma rápida la solución de asignación que recomienda el Diagrama de Masas.

Del problema nº2 conocemos el perfil longitudinal del trazado, que muestra dos zonas de desmorte situadas al inicio y al final del trazado y un tramo intermedio de terraplenado. El trazado tiene una longitud de 3,5 kilómetros y todos los materiales de excavación son aprovechables como material de relleno. Como podemos entender, los materiales de desmorte irán a parar a la zona de relleno para completar la explanación.

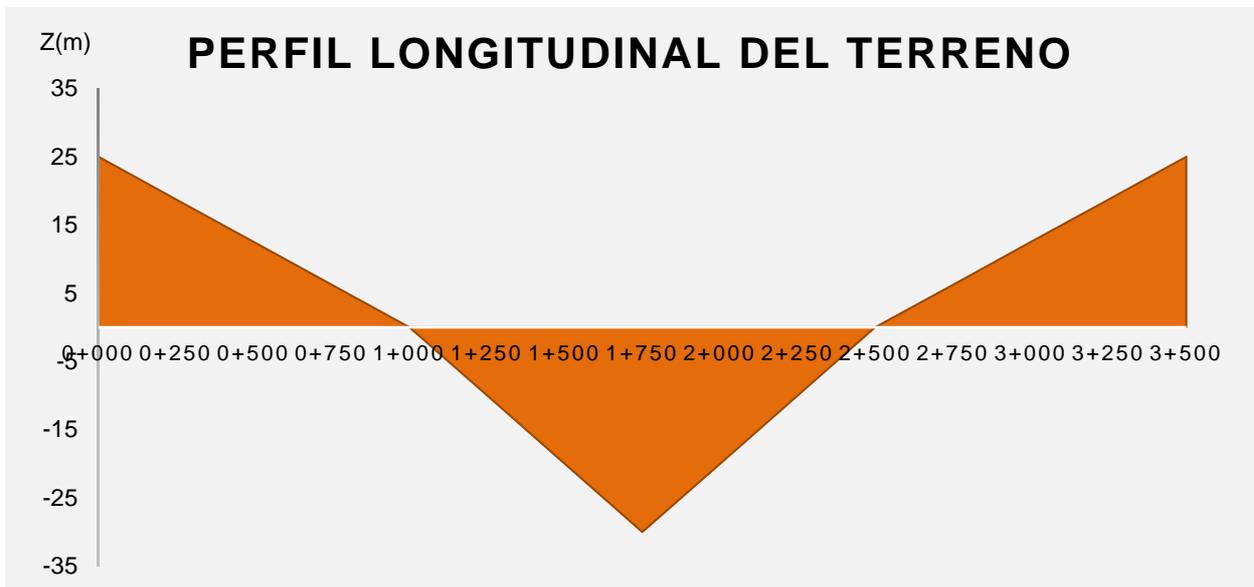


Ilustración 15 – Perfil longitudinal de terreno. Problema propuesto nº2

Para comprender mejor los volúmenes de tierras de los que disponemos analizamos el balance de masas en la traza.

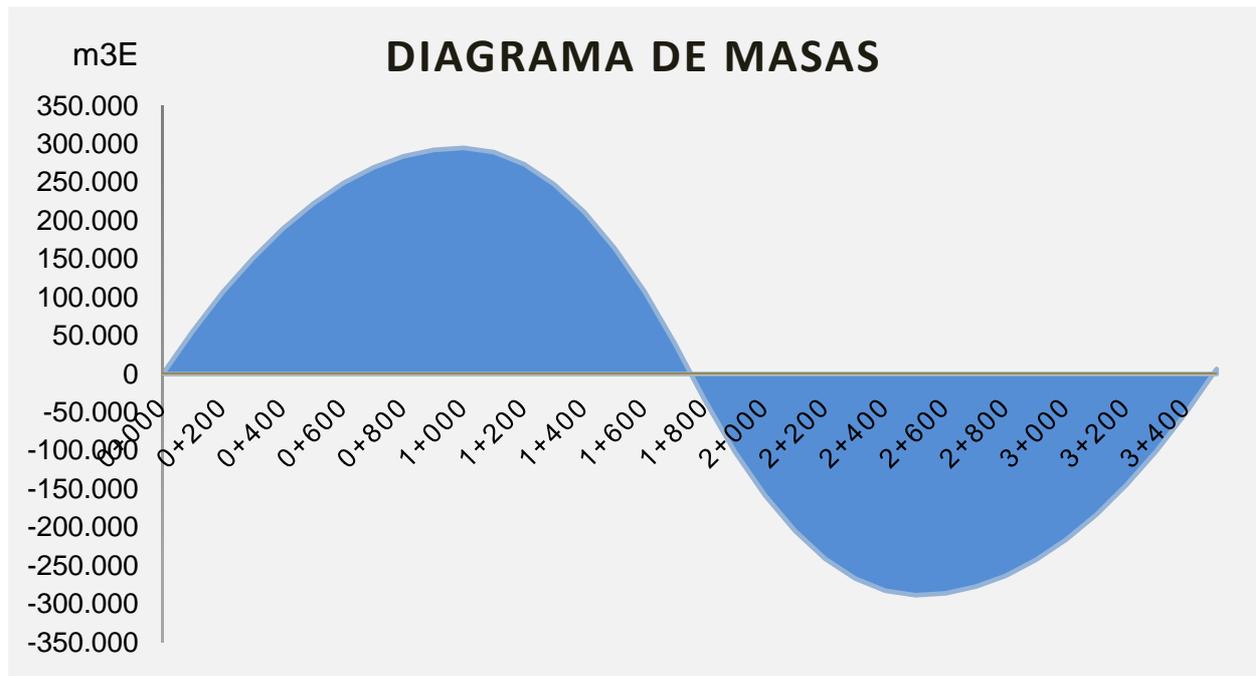


Ilustración 16 – Balance de Masas. Problema propuesto nº2

El balance de masas muestra los volúmenes de excavación y terraplenado necesarios una vez ya retirada la capa superficial de tierra vegetal, de profundidad 20 cm. El movimiento de tierras afecta a una banda de 20 metros de ancho. Como se puede observar el balance está prácticamente compensado. Tenemos un excedente de material de excavación, aunque mínimo, que deberá llevarse a vertedero.

El DM resuelve la asignación empleando mototraíllas entre las jorobas del balance cubriendo su distancia económica de 1500 metros, empleando los dúmperes para los puntos de excavación y relleno más alejados. El material sobrante al final del trazado se transportará a vertedero con camiones. Los dúmperes acarrearán 162.000 m3E de tierras a zonas de terraplenado y las mototraíllas, por su parte, 421.200 m3E del total de 583.200 m3E disponibles de excavación. Los camiones realizarán el transporte de 2.240 m3E de tierras sobrantes a vertederos.

Este análisis deriva del ahorro económico que suponen los dúmperes en distancias mayores. El Modelo, por su parte, consigue optimizar las asignaciones de manera que las mototraíllas puedan realizar toda la compensación en la traza, respetando siempre sus distancias de trabajo económicas. De esta forma se consigue reducir el coste de ejecución de la explanación, evitando el sobre coste de tener que incorporar a la obra una excavadora y una flota de dúmperes.

Estos son los resultados obtenidos para el problema:

VARIABLE vmov.L	590.400 m3E	m3E tierras movidos en proyecto
VARIABLE vado.L	583.680 m3E	Volumen a acarrear dentro de la obra
VARIABLE vtp.L	0 m3E	Volumen total adquirido en préstamos
VARIABLE vtv.L	6.720 m3E	Volumen total a vertederos
VARIABLE plazo.L	246,71 días	Duración de los trabajos de mdt
Best possible:	631.301,87 €	Coste de ejecución

EQUIPO	DESMONTE	VERTEDERO	SUELO	M3E
E3	i1	v1	m1	3.333,33
E1	l1	V2	m1	3.386,67

EQUIPO	DESMONTE	RELLENO	SUELO	M3E
E2	i1	j6	m1	49.800
E2	i2	j3	m1	8.072
E2	i2	j4	m1	1.896
E2	i2	j7	m1	40.552
E2	i3	j2	m1	12.984
E2	i3	j3	m1	18.040
E2	i3	j8	m1	13.496
E2	i4	j5	m1	38.520
E2	i5	j4	m1	25.488
E2	i5	j6	m1	7.032
E2	i6	j7	m1	26.520
E2	i7	j8	m1	20.520
E2	i8	j4	m1	6.448
E2	i8	j5	m1	8.072
E2	i9	j1	m1	5.632
E2	i9	j2	m1	2.888
E2	i10	j4	m1	2.520
E2	i11	j12	m1	2.520
E2	i12	j10	m1	2.888
E2	i12	j15	m1	5.632
E2	i13	j10	m1	14.520
E2	i14	j9	m1	20.432
E2	i14	j10	m1	88
E2	i15	j9	m1	26.520
E2	i16	j10	m1	32.520
E2	i17	j11	m1	38.520
E2	i18	j8	m1	40.736
E2	i18	j9	m1	3.784
E2	i19	j9	m1	16.336
E2	i19	j11	m1	8.072
E2	i19	j13	m1	26.112
E2	i20	j10	m1	6.816
E2	i20	j12	m1	33.832
E2	i20	j14	m1	15.872

El resultado de la asignación que permite el empleo de mototraíllas como único equipo de trabajo realizando operaciones de excavación y transporte de tierras en la obra visto en forma de tabla de coordenadas sería el siguiente. Como podemos observar, algunas de las secciones en desmonte sirven a varias secciones en terraplén. Los camiones se emplearán para llevar a vertedero las tierras sobrantes de la excavación en el tramo de desmonte 'i1'.

	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7	i8	i9	i10	i11	i12	i13	i14	i15	i16	i17	i18	i19	i20
j1									■											
j2			■						■											
j3		■	■																	
j4		■			■			■		■										
j5				■				■												
j6	■				■															
j7		■				■														
j8			■				■												■	
j9													■	■				■	■	
j10												■	■	■		■				■
j11																	■		■	
j12											■									■
j13																			■	
j14																				■
j15												■								
v1	■																			

El perfil longitudinal de la obra, para el problema propuesto nº3, tiene una longitud de 3 kilómetros. El movimiento de tierras afecta a una banda de 20 metros y el espesor de la cubierta vegetal es de 30 cm. Se distinguen dos zonas de trabajo claras. La distancia económica de las mototraíllas es de 1.500 metros. Por un lado, desmonte del terreno hasta el punto medio del trazado y, a continuación, trabajos de terraplenado hasta alcanzar la cota del eje de la obra. Entendemos que el transporte del material, durante los trabajos de ejecución de la explanación, se realizará de izquierda a derecha en el trazado.

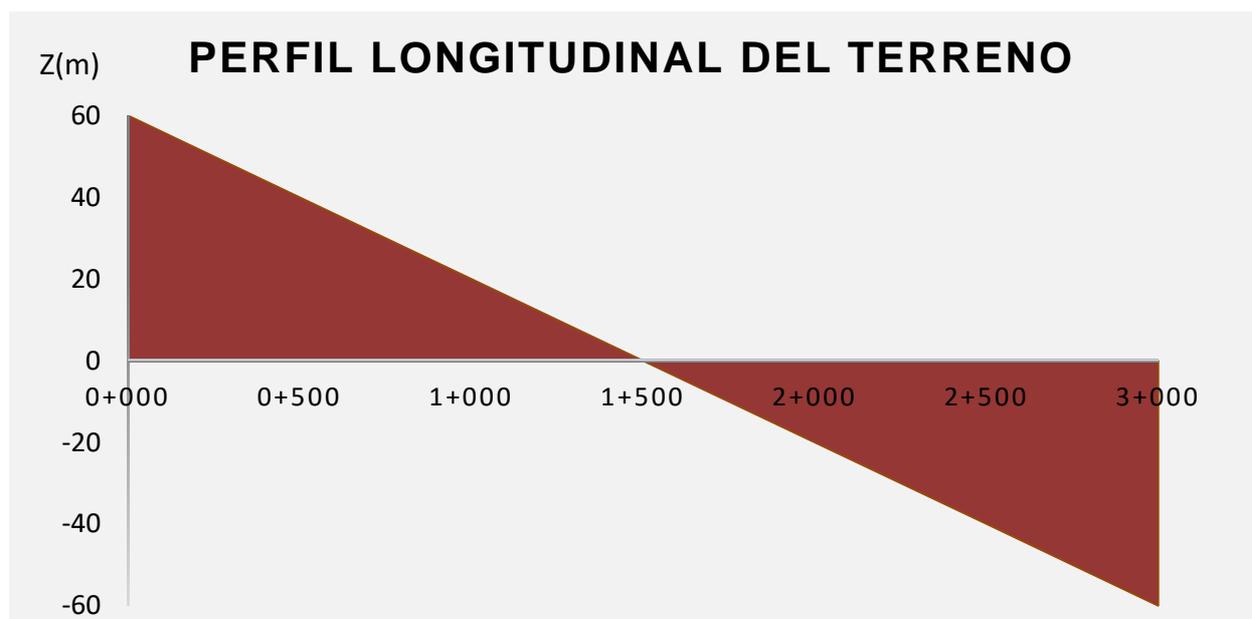


Ilustración 17 – Perfil longitudinal de terreno. Problema propuesto nº3

El balance de masas muestra un déficit de material disponible para ejecutar la explanación de la obra lineal. Por

lo que esta cantidad deberá traerse a la obra desde los puntos de préstamo.

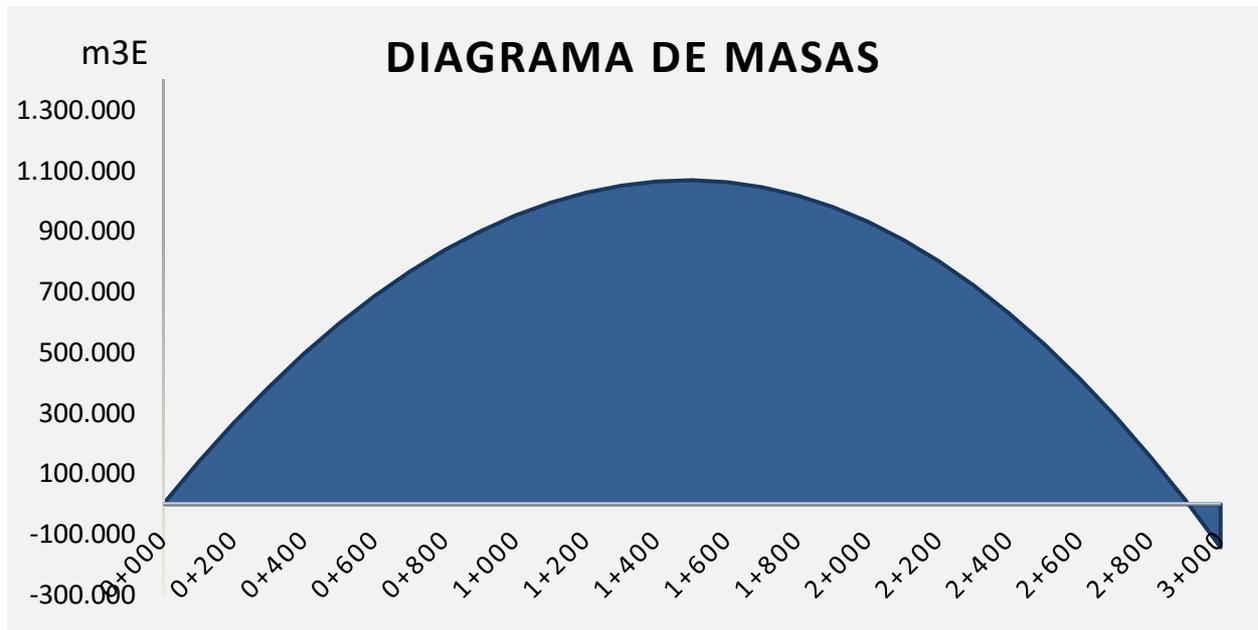


Ilustración 18 – Balance de Masas. Problema propuesto nº3

En este caso, el Modelo resuelve la compensación de modo similar a como lo hace el DM. Por una parte, se adquieren tierras de préstamos para su aporte al relleno en el final del trazado y, para la compensación en la traza se emplean mototraíllas, operando en distancias económicas de 1500 metros y dúmperes en las asignaciones a mayores distancias.

Los resultados que aporta el Modelo son los siguientes:

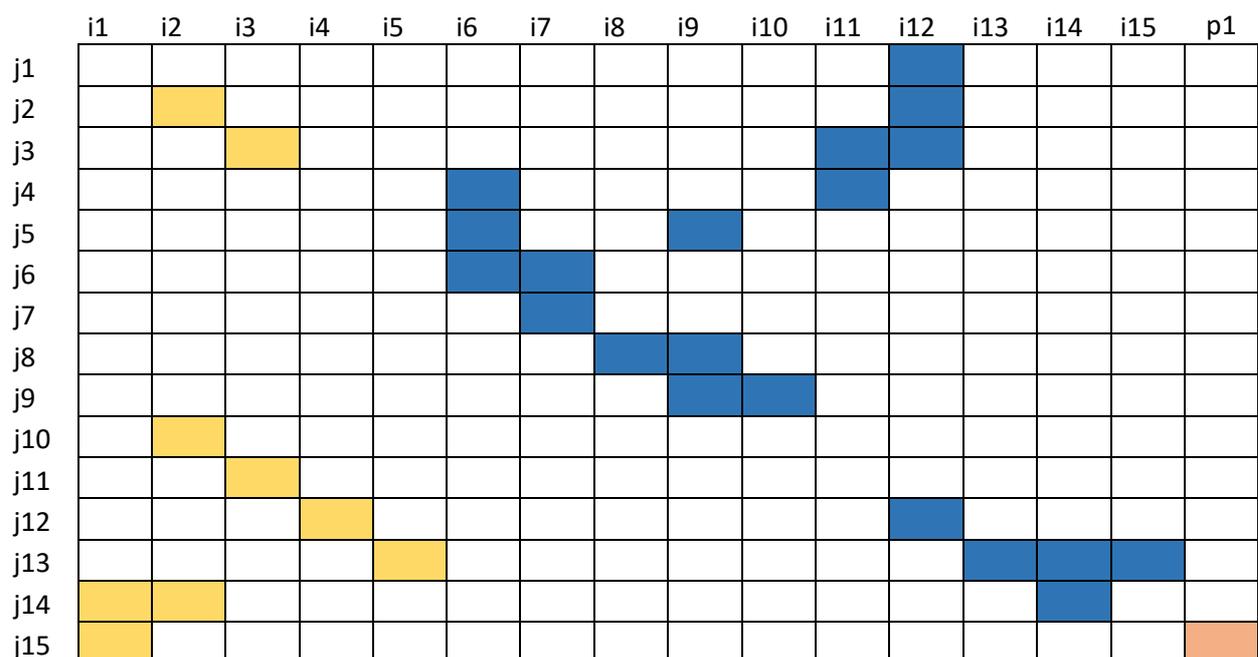
VARIABLE vmov.L	1.212.010 m3E	m3E tierras movidos en proyecto
VARIABLE vado.L	1.069.186 m3E	Volumen a acarrear dentro de la obra
VARIABLE vtp.L	142.824 m3E	Volumen total adquirido en préstamos
VARIABLE vtv.L	0 m3E	Volumen total a vertederos
VARIABLE plazo.L	611,90 días	Duración de los trabajos de mdt
Best possible:	2.112.646,82 €	Coste de ejecución

EQUIPO	PRÉSTAMO	RELLENO	SUELO	M3E
E3	p1	j15	m1	142.824

EQUIPO	DESMONTE	RELLENO	SUELO	M3E
E1	i1	j15	m1	12.643
E1	i1	j14	m1	125.836
E1	i2	j14	m1	11.982
E1	i2	j2	m1	14.763
E1	i2	j10	m1	102.134
E1	i3	j3	m1	6.478

E1	i3	j11	m1	112.801
E1	i4	j12	m1	109.679
E1	i5	j13	m1	100.079
E2	i10	j9	m1	52.079
E2	i11	j3	m1	10.070
E2	i11	j4	m1	32.409
E2	i12	j2	m1	2.038
E2	i12	j1	m1	6.134
E2	i12	j3	m1	10.919
E2	i12	j12	m1	13.788
E2	i13	j13	m1	23.279
E2	i14	j13	m1	6.696
E2	i14	j14	m1	6.983
E2	i15	j13	m1	4.080
E2	i6	j4	m1	5.725
E2	i6	j5	m1	36.032
E2	i6	j6	m1	48.722
E2	i7	j6	m1	10.745
E2	i7	j7	m1	70.134
E2	i8	j8	m1	71.279
E2	i9	j8	m1	9.522
E2	i9	j5	m1	12.769
E2	i9	j9	m1	39.388

En este ejemplo, vemos los tramos de la obra en los que se emplean mototraíllas para la excavación y transporte de las tierras (en azul) y el rango de actuación de los dúmperes (en amarillo). También podemos ver que necesitamos adquirir tierras del punto de préstamo considerado para ejecutar el relleno en el tramo 'j15'.



Por último, analizamos el problema nº7. Se trata de una obra lineal de 9,5 kilómetros de longitud de la que conocemos el diagrama de masas resultante de los trabajos de movimiento de tierras que hay que realizar en la construcción de la obra lineal. Como podemos ver, existe una zona de terraplenado del p.k. 0+000 al p.k. 2+000, a continuación, se presentan dos tramos consecutivos en desmonte, hasta el p.k. 6+000, y en el subtramo final de 3,5 kilómetros, esto es, hasta el p.k. 9+500 se ejecuta en terraplén. Podemos ver que tenemos un excedente de material de excavación que deberemos llevar a vertedero.

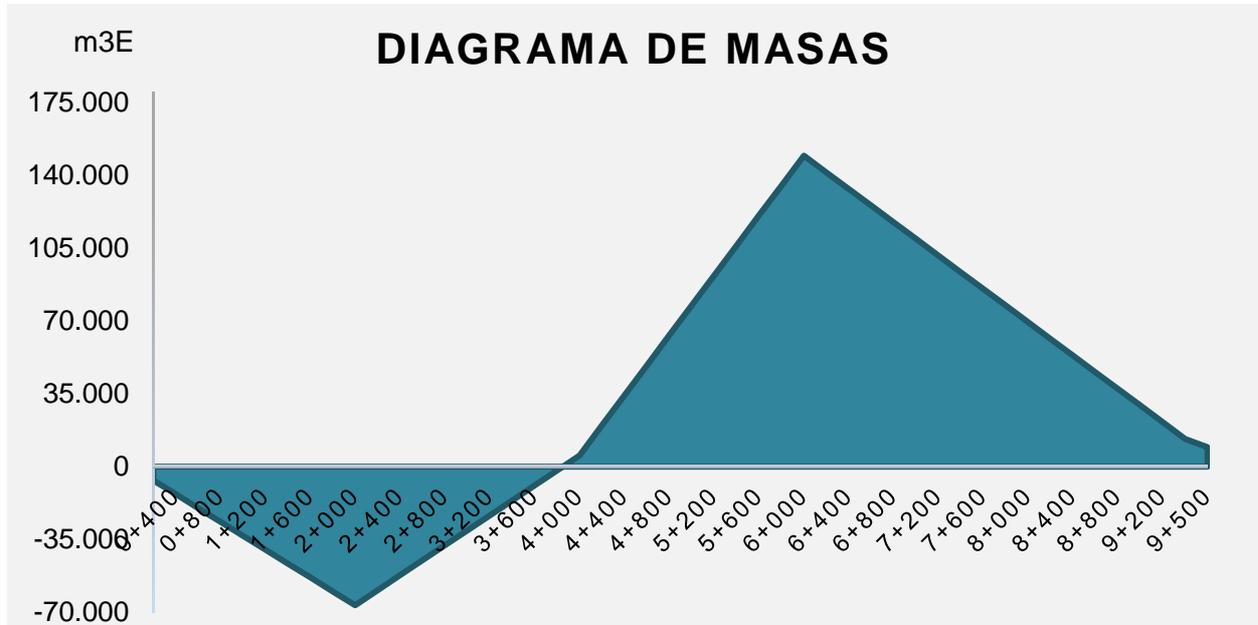


Ilustración 19 – Balance de Masas. Problema propuesto nº7

La compensación propuesta por el método del DM establece el movimiento de material, de derecha a izquierda en el del primer tramo en desmonte hacia las zonas de terraplenado al inicio del trazado, y de izquierda a derecha del segundo tramo en excavación a las zonas de terraplenado que continúan hasta el final de la traza.

El Modelo, al igual que el DM, lleva a vertederos las tierras sobrantes situadas entre los puntos kilométricos p.k 4+000 y p.k. 4+200, y para la compensación de materiales en la traza establece una asignación similar, entre los tramos 1 y 2, de terraplenado y desmonte, y los 3 y 4, empleando las mototraíllas entre los puntos más cercanos y los dúmpers para las distancias mayores

Se presentan los resultados del Modelo:

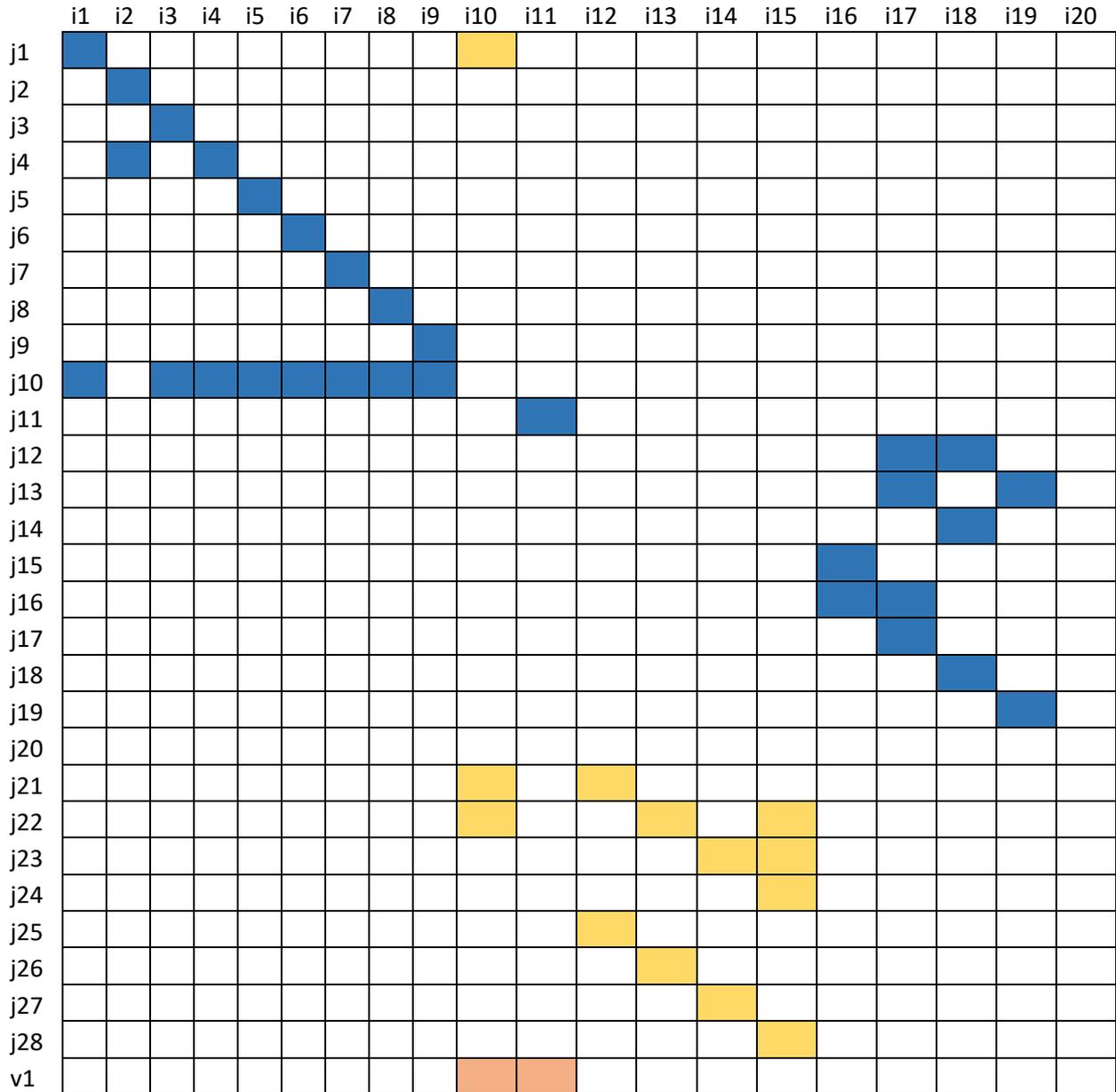
VARIABLE vmov.L	209.780 m3E	m3E tierras movidos en proyecto
VARIABLE vado.L	206.670 m3E	Volumen a acarrear dentro de la obra
VARIABLE vtp.L	0 m3E	Volumen total adquirido en préstamos
VARIABLE vtv.L	9.330 m3E	Volumen total a vertederos
VARIABLE plazo.L	117,95 días	Duración de los trabajos de mdt
Best possible:	421.737,93 €	Coste de ejecución

EQUIPO	DESMONTE	VERTEDERO	SUELO	M3E
E3	i10	v1	m1	2.930
E3	i11	v1	m1	6.400

EQUIPO	DESMONTE	RELLENO	SUELO	M3E
E1	i10	j1	m1	1.870
E1	i10	j21	m1	1.600
E1	i10	j22	m1	800
E1	i12	j21	m1	6.400
E1	i12	j25	m1	8.000
E1	i13	j22	m1	6.400
E1	i13	j26	m1	8.000
E1	i14	j23	m1	6.400
E1	i14	j27	m1	8.000
E1	i15	j22	m1	800
E1	i15	j23	m1	1.600
E1	i15	j24	m1	8.000
E1	i15	j28	m1	4.000
E2	i1	j1	m1	4.797
E2	i1	j10	m1	2.403
E2	i2	j2	m1	6.667
E2	i2	j4	m1	533
E2	i3	j3	m1	6.667
E2	i3	j10	m1	533
E2	i4	j4	m1	6.134
E2	i4	j10	m1	1.066
E2	i5	j5	m1	6.667
E2	i5	j10	m1	533
E2	i6	j6	m1	6.667
E2	i6	j10	m1	533
E2	i7	j7	m1	6.667
E2	i7	j10	m1	533
E2	i8	j8	m1	6.667
E2	i8	j10	m1	533
E2	i9	j9	m1	6.667
E2	i9	j10	m1	533
E2	i11	j11	m1	8.000
E2	i16	j15	m1	8.000
E2	i16	j16	m1	6.400
E2	i17	j12	m1	3.200
E2	i17	j13	m1	1.600
E2	i17	j16	m1	1.600
E2	i17	j17	m1	8.000
E2	i18	j12	m1	4.800
E2	i18	j14	m1	8.000
E2	i18	j18	m1	1.600
E2	i19	j13	m1	6.400
E2	i19	j19	m1	8.000

Representamos el gráfico de asignaciones, donde podemos observar en qué secciones operan las mototraíllas, los dúmperes y los camiones. Vemos que se respeta el hecho de que equipos de trabajo diferentes deban ser

asignados a zonas de trabajo diferenciadas dentro de la obra, y que se transportan a vertedero tierras sobrantes de la excavación en los tramos 'i10' e 'i11'.



A continuación, se presentan los resultados obtenidos desde un punto de vista global.

Debemos aclarar, que el estudio de la compensación en el trazado de La Variante lo hemos planteado en dos partes. Por un lado, se ha aplicado el Modelo en el balance de volúmenes en los caminos de servicio y, posteriormente, en base a los volúmenes de excavación sobrantes, se ha resuelto la compensación en el Tronco de la carretera. Los resultados de coste y plazo responden a la suma de los valores obtenidos en los dos casos.

El resultado que alcanza el Modelo garantiza la resolución de los trabajos de compensación de tierras en el trazado, sin embargo, no podemos garantizar que la solución obtenida pueda estar en sintonía y responda adecuadamente a una planificación de obra real que deba minimizar la afectación de la obra en el entorno. En el proyecto de la Variante se planteó una planificación de la obra por tramos, de modo que la ejecución de la obra respondía a los requisitos de mínimas alteraciones al tráfico durante el curso de las obras.

Presentamos un gráfico donde se compara el valor obtenido para el coste de los trabajos entre las dos herramientas de planificación. Como se puede observar, el coste se reduce en todos los problemas cuando el estudio de las asignaciones de materiales en la obra lo resolvemos aplicando el Modelo. El gráfico también muestra la desviación en coste entre los dos métodos. Se traduce como un porcentaje del ahorro que supone esta herramienta en comparación con el DM.

En el caso del proyecto de La Variante de las Cabezas el coste de ejecución de los trabajos que calcula Gams es sensiblemente inferior al presupuesto estimado de ejecución del proyecto real, que se basaba en el estudio del DM. La conclusión que podemos sacar es que, en nuestro caso, no se han considerados los costes asociados a la nivelación, extendido y compactación de las capas en las zonas de terraplenado. No obstante, aun considerando estas operaciones el ahorro sería importante. Esto se debe a que, en situaciones de relieves irregulares, con muchas jorobas a lo largo de la traza y medias ladera, y diferentes tipos de suelos en excavación y rellenos, el empleo de técnicas de programación lineal para la planificación de los trabajos parece que da sus mejores resultados.

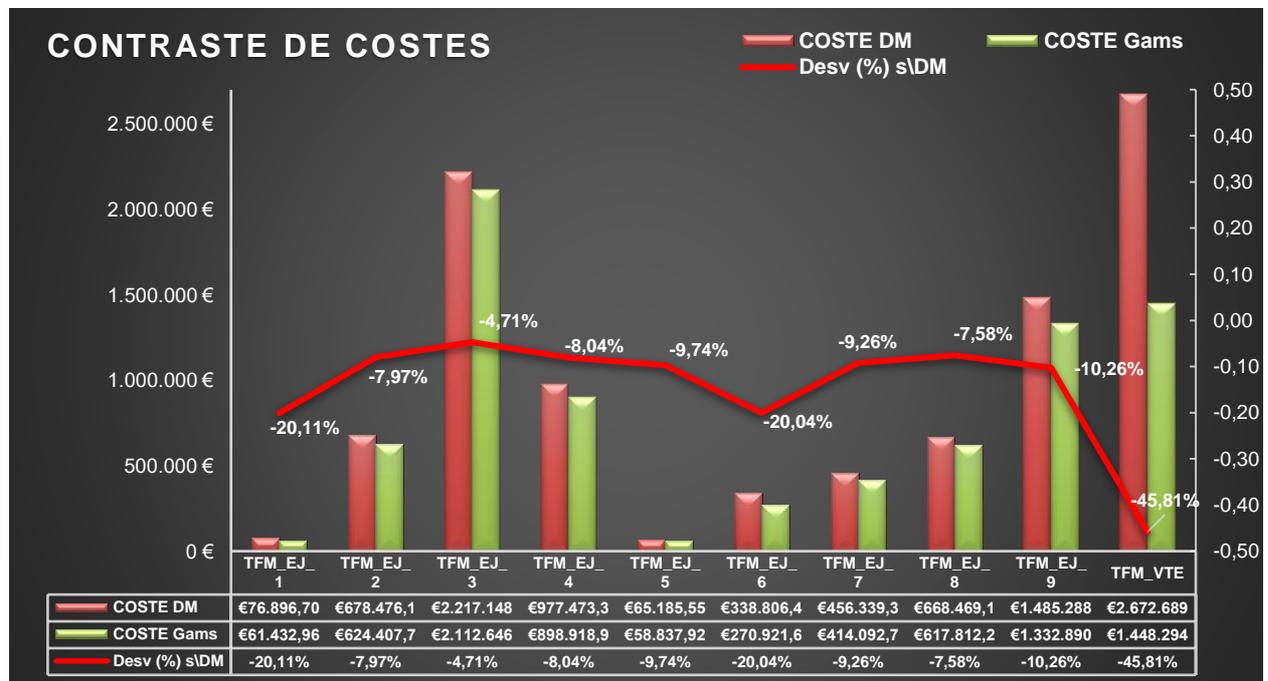


Tabla 1 – Contraste de costes con el Diagrama de Masas

Otro detalle interesante sería la estimación de ahorro de una empresa especializada en la construcción de obras de caminos si se decidiera a utilizar el Modelo propuesto en el estudio de los trabajos de compensación en el trazado. El ahorro que supondría en la realización de trabajos de excavación y movimiento de tierras para una empresa que contara en cartera con este conjunto de obras sería de cerca de 2 millones de euros en el balance final del año.

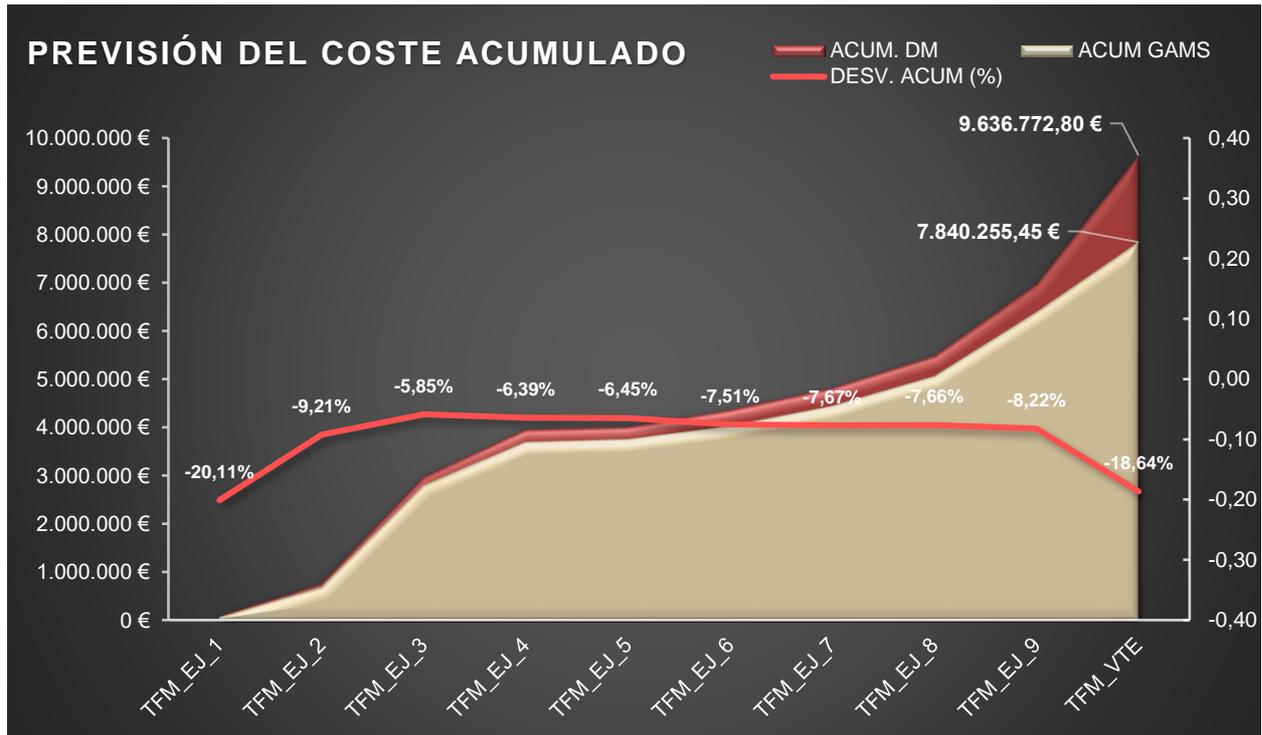


Tabla 2 – Valoración de los costes acumulados

Como ya hemos comentado, el Modelo optimiza el coste de los trabajos de compensación en la traza, pero no el plazo de duración de las obras. De esta forma, podemos ver que en algunos problemas el Modelo alcanza una solución mejor económicamente pero a costa de un plazo de ejecución de los trabajos mayor.

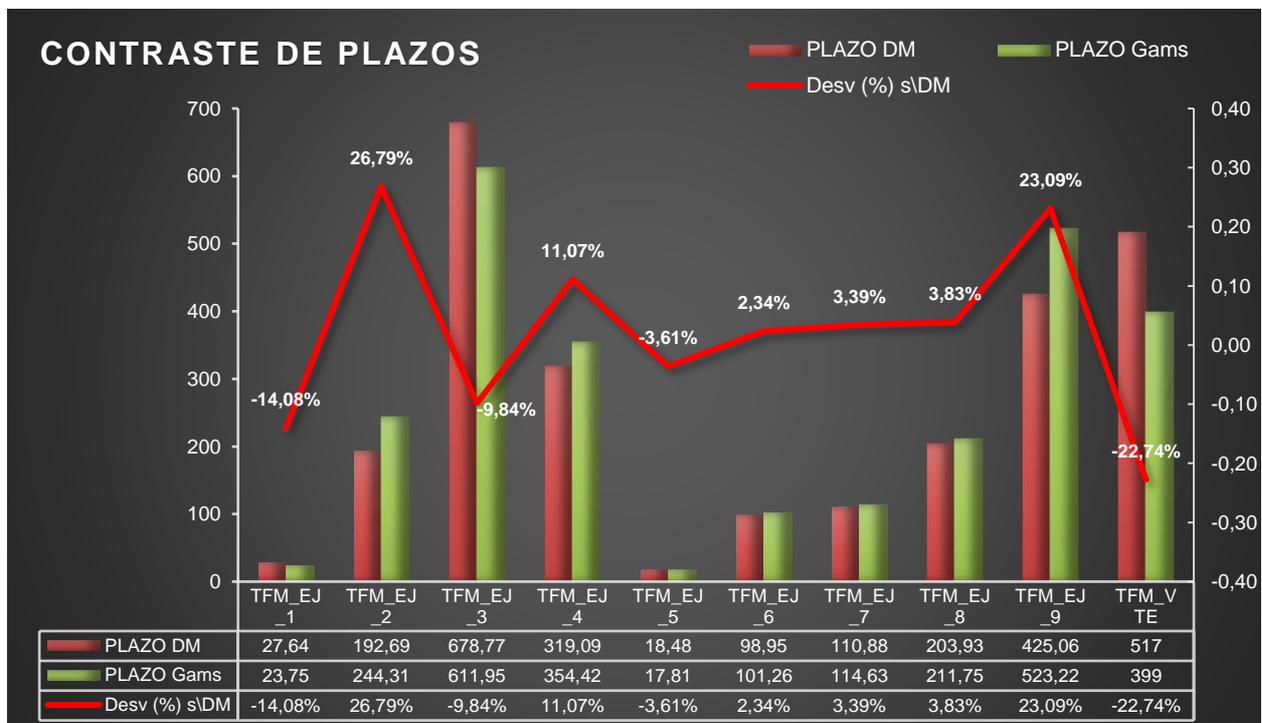


Tabla 3 – Contraste del Plazo de la Ejecución de la Obra

La desviación en la duración de las obras, en algunos casos puede ser importante, como en el problema resuelto

nº2 y nº9, donde la desviación alcanza varios meses. No obstante, lo mismo sucede, pero de forma inversa en los problemas nº3 y en la resolución de los trabajos en La Variante de las Cabezas (si bien es cierto que aquí no hemos tenido en cuenta los trabajos de desbroce del terreno previo a la excavación).

Parece que el Modelo es menos preciso o muestra mayores dificultades para aproximarse a la estimación de tiempos que aporta el Diagrama de Masas, que se calcula en base a las distancias medias de transporte de los equipos y sus producciones asociadas, cuando nos encontramos ante obras de envergadura mayor. Sin embargo, como se puede apreciar en el gráfico que se presenta a continuación, la tendencia en la duración de los trabajos es similar para ambos métodos, lo que nos empujan a ser optimistas en este sentido.

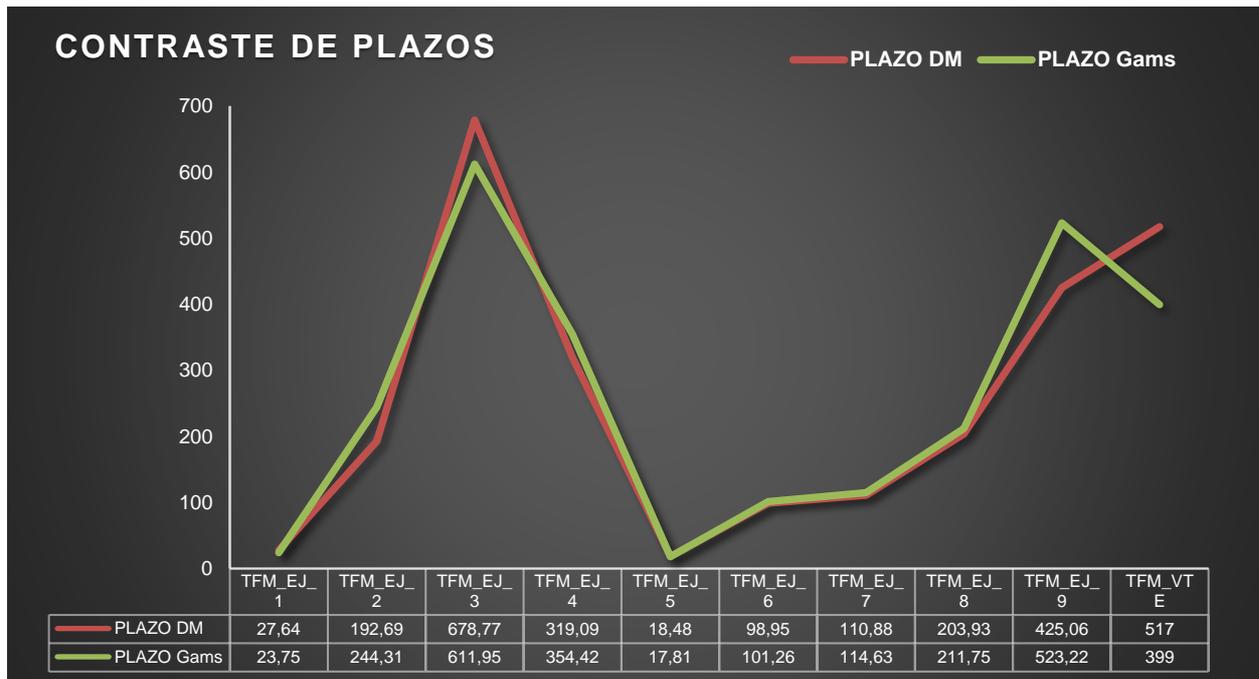


Tabla 4 – Tendencias en los Plazos de Ejecución

7 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del presente estudio aportan una serie de ideas, resultado de la comparación de dos herramientas de cálculo que actualmente se emplean en la planificación de los trabajos de compensación de volúmenes en las obras de caminos.

En vista a los resultados obtenidos, la aplicación de la Programación Lineal a las obras de caminos se antoja esperanzador. Sin embargo, y llegados a este punto, aún no podemos garantizar que el resultado de la asignación que obtenemos mediante la aplicación de técnicas de investigación operativa garantice un desarrollo de la obra mejor que las soluciones que aporta el Diagrama de Masas a estos problemas.

El trabajo de planificación de las asignaciones de materiales en la obra es complejo. Recomendamos, por tanto, la utilización del Modelo para su empleo como herramienta de apoyo a las decisiones de planificación, y de contraste con el estudio que proporciona el Diagrama de Masas.

Destacamos la utilización de Gams como herramienta de modelado, por la estructuración en la codificación del lenguaje y su potencia de resolución.

La Programación Lineal se presenta como una herramienta útil en su aplicación a los trabajos de movimiento de tierras en las obras de caminos. El modelado de un problema de carreteras no es excesivamente complicado y los resultados obtenidos abarcan la obra en su totalidad. No obstante, la introducción de los datos de problemas reales, como en el problema de la Variante de las Cabezas puede resultar compleja, en concreto en los puntos de enlaces o intersecciones entre viales, caminos secundarios, pasos a nivel, etc.

De la aplicación del modelo en la resolución de los problemas de geometría sencilla destacamos que la asignación que realiza en base a optimizar los trabajos de compensación en la traza parece estar en sintonía con el Diagrama de Masas. Podemos afirmar, por lo tanto, que las soluciones alcanzadas son viables, en tanto que se asemejan a la organización de trabajos que realiza el DM en las obras de caminos.

Sin embargo, destacamos que el comportamiento del modelo en situaciones de obra real, como en el proyecto de La Variante, donde nos encontramos con geometrías del terreno complejas y se tienen en cuenta un mayor número de condicionantes en la obra, parece que da sus mejores resultados.

Los resultados económicos obtenidos con la aplicación del modelo mejoran a aquellos que resultan del cálculo mediante el Diagrama de Masas, y que parten del cálculo de las distancias medias de transporte de los equipos. No obstante, no parece que la estimación de la duración de las obras se vea favorecida con la aplicación de esta herramienta. Como hemos dicho, el modelo establece la asignación en base a los costes unitarios mínimos para cada desplazamiento dentro de la obra, sin considerar su duración, lo que nos lleva a adoptar soluciones de obra mejores en términos económicos, pero con unos tiempos de ejecución en ocasiones mayores.

Si bien el modelo propone un procedimiento de ejecución de la obra y un coste asociado a ello, los resultados obtenidos deberán ser objeto de análisis, teniendo en cuenta que la realidad de la obra en ocasiones puede contradecir a lo que apuntamos sobre el papel.

8 DESARROLLOS FUTUROS

Los resultados obtenidos del proyecto aportan confianza en el uso de herramientas informáticas en la planificación de proyectos de caminos. Debemos considerar, no obstante, algunas mejoras que podrían incorporarse al modelo y que, conociendo la realidad de una obra lineal de caminos, pensamos que pueden resultar interesantes para su análisis en proyectos futuros, con el objetivo de avanzar en la aplicación eficaz de las técnicas de programación lineal a las obras de caminos.

La precisión en el cálculo de volúmenes parte de la división del trazado en un número determinado de perfiles transversales en desmonte, relleno o secciones a media ladera, respectivamente, tomando distancias entre perfiles de 20 o 30 metros habitualmente. En los problemas resueltos en el Trabajo esta división se hizo cada 100 metros de longitud, con vistas a reducir el tamaño y simplificar la introducción de los datos en el modelo.

Si nos ceñimos a las distancias entre secciones comúnmente empleadas, de 20 a 30 metros, el modelo aportará un resultado más ajustado a la compensación de volúmenes real en la traza y, en consecuencia, más preciso aparentemente. Sin embargo, puede ocurrir que en los casos en que consideramos el empleo de mototraíllas en la obra, el recorrido que estos equipos realizan durante el proceso de arranque y carga de material, de unos 40 metros, sea mayor a la distancia considerada entre secciones en la obra, de modo que, durante la ejecución de sus trabajos la mototraílla podría 'invadir' a otra sección anexa.

Este condicionante no lo tiene en cuenta nuestro modelo de programación y podría resultar importante en la organización de los equipos en la obra. En el caso de perfiles del terreno con presencia de muchas jorobas, es decir, donde confluyen un número grande de secciones en desmonte y terraplén repartidas en puntos diferentes a lo largo del trazado, el empleo de mototraíllas puede resultar improductivo. Por ejemplo, si nos encontráramos con una sección en desmonte ubicada entre dos secciones en terraplén, podría ocurrir que las traíllas no pudieran utilizarse aun cuando se tratara del medio de transporte más económico, ya que no se darían las condiciones necesarias para que pudieran realizar los trabajos de arranque y carga de las tierras. De igual modo, estos equipos tampoco serían adecuados para realizar la compensación de volúmenes a media ladera, ya que carecerían de espacio para trabajar con garantías.

Se propone profundizar en el estudio del modelo incorporando un conjunto de restricciones adicionales que trabajen en esta dirección, llevando el modelo a un nivel superior de detalle con vistas a poder trasladar la solución obtenida a campo con mayor eficacia.

El modelo no analiza las distancias medias de transporte de los equipos. No obstante, en base a los resultados obtenidos es sencillo calcular estas distancias. El hecho de analizar las distancias medias puede resultar interesante, ya que nos permitiría calcular y contrastar los costes unitarios de transporte obtenidos para los diferentes equipos con los que se obtienen mediante la aplicación del Diagrama de Masas.

Como mencionamos en el punto del alcance del modelo, en el Proyecto asumimos que las velocidades de los equipos nos son proporcionadas, y que derivan de un estudio previo de las características del trazado. Un modelo más avanzado podría diferenciar entre secciones de la obra donde las velocidades de ida o retorno se pudieran ver penalizadas o favorecidas en función de la orientación de las pendientes y de la tipología de los suelos en los viales interiores de la obra.

Por otra parte, podría ser recomendable, en futuros trabajos, calcular el tiempo invertido en los ciclos a préstamos y vertederos como diferenciando entre el recorrido que hacen los equipos dentro y fuera de la traza. Este razonamiento no lo hemos aplicado en el modelo, pero su aplicación sería sencilla, valorando las distancias de transporte a estos puntos como una parte fija de desplazamiento por carretera, igual en todos los casos, y otra parte variable que dependa de la desde cada tramo en excavación o desmonte al punto de acceso a la obra.

El modelo nos da el plazo previsto de ejecución de los trabajos, pero no lo optimiza, sino que se centra en optimizar el coste. Debemos prestar atención a ello, ya que el inicio de un proyecto siempre viene acompañado de un plazo preestablecido hasta su terminación. La optimización duración-coste de la obra no es sencilla. Una obra a la que se destina mayor número de recursos, como norma general, terminará en un plazo menor a cambio

de un mayor coste, y viceversa. Sin embargo, es cierto que una obra que tiende a extenderse en el tiempo siempre acarreará un coste final mayor.

Lo que si nos permite el modelo es identificar las variaciones que se producen en los tiempos y el coste de la obra cuando durante la excavación empleamos un número de equipos mayor o menor, por ejemplo, en que caso de que utilicemos una única excavadora o varias. No obstante, y en vista de los resultados que aporta el Modelo, proponemos la revisión del concepto de duración de las obras que el modelo calcula en base a una suma de los tiempos invertidos en cada ciclo de transporte. De esta forma, el modelo no considera que las tierras de préstamos puedan estar llegando a la obra al mismo tiempo que se realizan acarrees de materiales en la traza a la hora de repercutir los tiempos en el plazo. Esto puede ofrecernos un rango de actuación más amplio, de modo que podamos considerar la conveniencia de una solución en función del requisito principal del proyecto (mínimo coste o mínimo plazo).

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robert L. Peurifoy, *Construction Planning, Equipment, and Methods*, McGraw Hill
- [2] Juan Tiktin, *Procedimientos Generales de Construcción*, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
- [3] Carlos Kraemer, *Ingeniería de Carreteras. Volumen II*, McGraw Hill
- [4] PG-3. *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*
- [5] Juan L. Rubio Martín, Rafael Jurado Piña, J. Ignacio Pérez Díaz, *Optimización de los movimientos de tierras en proyectos de obras lineales mediante técnicas de programación lineal: modelo basado en rendimiento de construcción*
- [6] Said M. Easa, *Earthwork Allocations with Nonconstant Unit Costs*, M. ASCE
- [7] A. K. W Jayawardane ad F. C. Harris, *Further Development of Integer Programming in Earthwork Optimization*
- [8] Juan Cherné Tarilonte, Andrés González Aguilar, *Construcciones Industriales*, E.T.S. Ingeniería, Universidad de Sevilla
- [9] J. David Canca Ortiz, *Construcción de Modelos de Programación Lineal*, E.T.S. Ingeniería, Universidad de Sevilla
- [10] *Apuntes de Movimiento de Tierras de la asignatura Construcción y Arquitectura Industrial del MII*, Universidad de Sevilla


```

i15  100  200  300  400  500  600  700  800  900  1000  1100  1200
      1300  1400  1500;

```

Table distV(i,v) 'matriz distancias a vertedero'

```

      v1    v2
i1    200  10000
i2    300  10000
i3    400  10000
i4    500  10000
i5    600  10000
i6    700  10000
i7    800  10000
i8    900  10000
i9   1000  10000
i10  1100  10000
i11  1200  10000
i12  1300  10000
i13  1400  10000
i14  1500  10000
i15  1600  10000;

```

Table distP(p,j) 'matriz distancias de préstamo a relleno'

```

      j1    j2    j3    j4    j5    j6    j7    j8    j9    j10   j11   j12
      j13   j14   j15
p1   1100  1200  1300  1400  1500  1600  1700  1800  1900  2000  2100  2200
      2300  2400  2500
p2  10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000
      10000 10000 10000;

```

Table QD(i,m) 'matriz volúmenes m en desmonte i (m3E)'

```

      m1    m2    m3
i1   1384790  0
i2   1288790  0
i3   1192790  0
i4   1096790  0
i5   1000790  0
i6   90479  0  0
i7   80879  0  0
i8   71279  0  0
i9   61679  0  0
i10  52079  0  0
i11  42479  0  0
i12  32879  0  0
i13  23279  0  0
i14  13679  0  0
i15  4080  0  0;

```

Table QT(j,m) 'matriz volúmenes m en terraplén j (m3E)'

```

      m1    m2    m3
j1   6134  0  0

```

```

j2  16801 0 0
j3  27467 0 0
j4  38134 0 0
j5  48801 0 0
j6  59467 0 0
j7  70134 0 0
j8  80801 0 0
j9  91467 0 0
j10 1021340 0
j11 1128010 0
j12 1234670 0
j13 1341340 0
j14 1448010 0
j15 1554670 0;

```

Table QP(p,m) 'matriz disponibilidad m préstamo p (m3E)'

```

      m1    m2    m3
p1  20000010000 0
p2  2000002000000;

```

Scalar

```

jorn 'jornada de trabajo (h/dia)' /8/
fh 'factor eficiencia horaria' /0.8333/
deco 'distancia económica Traíllas en m' /1500/
mt 'número de mototraíllas disponibles en obra' /2/
prodRetro 'produccion de la retroexcavadora CAT365' /234.71/
chRetro 'coste horario de la Retro CAT 365' /130/
CS 'cota superior' /300000/, CI 'cota inferior' /0.001/;

```

Parameter QV(v) 'capacidad disponible en vertedero (m3E)' /v1 10000,v2 200000/;

Parameter vida(e) 'velocidad en carga km/h' /e1 25,e2 24,e3 30/;

Parameter vret(e) 'velocidad en vacío km/h' /e1 50,e2 48,e3 70/;

Parameter tcarga(e) 'tiempo carga en min' /e1 2.83,e2 1,e3 3.4/;

Parameter tdesc(e) 'tiempo de descarga y maniobras en min' /e1 1.5,e2 1.3,e3 2/;

Parameter cap(e) 'capacidad de carga por equipo (m3E)' /e1 13.5,e2 20,e3 15.96/;

Parameter ch(e) 'coste horario por equipo (€/h)' /e1 100,e2 160,e3 40/;

**Tiempo(en minutos) para realizar un ciclo completo(carga+transporte+descarga+retorno)*

Parameter Tc(e,i,j) 'Tiempo de ciclo de i a j';

$Tc(e,i,j)=tcarga(e)+tdesc(e)+dist(i,j)*(60/1000)*(1/vida(e)+1/vret(e));$

Parameter Tcv(e,i,v) 'Tiempo de ciclo a vertedero';

$Tcv('e3',i,v)=tcarga('e3')+tdesc('e3')+distv(i,v)*(60/1000)*(1/vret('e3')+1/vret('e3'));$

Parameter Tcp(e,p,j) 'Tiempo de ciclo desde préstamo';

$Tcp('e3',p,j)=tcarga('e3')+tdesc('e3')+distp(p,j)*(60/1000)*(1/vret('e3')+1/vret('e3'));$

**Equipos necesarios para que La maquinaria de carga trabaje sin pausa*

Parameter equip(e,i,j);

```

equip('e1',i,j)=round(Tc('e1',i,j)/tcarga('e1'));
equip('e2',i,j)=mt;
equip('e3',i,j)=round(Tc('e3',i,j)/tcarga('e3'));
Parameter equipv(e,i,v);
equipv('e3',i,v)=round(Tcv('e3',i,v)/tcarga('e3'));
Parameter equipp(e,p,j);
equipp('e3',p,j)=round(Tcp('e3',p,j)/tcarga('e3'));

```

```

Parameter produccion(e,i,j) 'Producción de las Mototrallas para cada trayecto';
produccion('e1',i,j)=prodRetro;
produccion('e3',i,j)=prodRetro;
produccion('e2',i,j)=mt*cap('e2')*fh/Tc('e2',i,j)*60;

```

**Costes unitarios de transporte en €/m³E de tierras acarreadas*

```

Parameter C(e,i,j) 'coste de transporte de i a j';
C('e1',i,j)=(equip('e1',i,j)*ch('e1')+chRetro)/prodRetro;
C('e2',i,j)=(equip('e2',i,j)*ch('e2'))/produccion('e2',i,j);
Parameter CV(e,i,v,m) 'coste de transporte a vertedero v';
CV('e3',i,v,m)=(equipv('e3',i,v)*ch('e3')+chRetro)/prodRetro;
Parameter CP(e,p,j,m) 'coste de adquisición en préstamo p';
CP('e3',p,j,m)=(equipp('e3',p,j)*ch('e3')+chRetro)/prodRetro;

```

**Resultado del Balance de tierras*

```

Parameter balance(m) 'balance de tierras en obra';
balance(m)=sum(i,Qd(i,m))-sum(j,Qt(j,m));

```

```

display balance, Tc, Tcv, Tcp, equip, equipv, equipp, C, CV, CP;

```

Variable

Fobj	'Función Objetivo'
x(e,i,j,m)	'vol.Tierras de excavación i a relleno j en equipo e'
xv(e,i,v,m)	'vol.Tierras de excavación i a vertedero v en equipo e'
xp(e,p,j,m)	'vol.Tierras de préstamo p a relleno j'
vpm(p,m)	'Tierras adquiridas en préstamo p'
vp(m)	'Tierras a traer de préstamos'
vtp	'Volumen total adquirido en préstamos'
vvm(v,m)	'Tierras a vertedero v'
vv(m)	'Tierras llevadas a vertederos'
vtv	'Volumen total a vertederos'
vem(e,m)	'Tierras acarreadas en obra por equipos'
ve(e)	'Total tierras a acarrear por equipos'
vado	'Volumen a acarrear dentro de la obra'
vmov	'm ³ E tierras movidos en proyecto'
dias(e,m)	'duración de los trabajos de compensación de tierras dentro de la traza, por equipo y material de excavación'
diasp(e,m)	'duración de los trabajos de compensación de tierras traídas de préstamos'
sumadias(e)	'tiempo total en obra de cada equipo de trabajo'
plazo	'duración de los trabajos de MdT'

$Y(i,j)$ 'var bin Y , 1 si la dist de i a j es $>$ que la dist económica de transporte de las traíllas'
 $a(m)$ 'var bin a , 1 si el balance de tierras es positivo (para cada tipo de suelo)'
 $z(m)$ 'var bin z , 1 si el balance de tierras es negativo'
 $k(i)$ 'var bin k , 1 si dúmperes operan en la sección de desmote i '
 $r(i)$ 'var bin r , 1 si traíllas operan en la sección de desmote i ';

Positive variables x, xv, xp ;

Binary variables Y, L, a, z, k, r ;

Equations

E_obj 'define la Función Objetivo'
 $E_volD(i,m)$ 'satisface balance de excavación i '
 $E_volT(j,m)$ 'satisface balance de relleno j '
 $E_capP(p,m)$ 'satisface limitación capacidad en préstamos'
 $E_capV(v)$ 'satisface limitación capacidad en vertederos'
 $E_vpm(p,m)$ 'Tierras adquiridas en préstamo p '
 $E_vp(m)$ 'Tierras a traer de préstamos'
 E_vtp 'Volumen total de préstamos'
 $E_vvm(v,m)$ 'Tierras a vertedero v '
 $E_vv(m)$ 'Tierras llevadas a vertederos'
 E_vtv 'Volumen total a vertederos'
 $E_vem(e,m)$ 'Tierras acarreadas en obra por equipos'
 $E_ve(e)$ 'Total tierras a acarrear por equipos'
 E_vado 'Volumen a acarrear dentro de la obra'
 E_vmov 'm³E tierras movidos en proyecto'

$E_1_BALANCE(m)$ 'prioriza el aprovechamiento de las tierras de excavación'
 $E_2_BALANCE(m)$
 $E_3_BALANCE(m)$
 $E_4_BALANCE(m)$

$E_1_TRAILLAS(i,j)$ 'satisface las distancias económicas de transporte de las mototraíllas'
 $E_2_TRAILLAS(i,j)$

$E_TRAILLAS(i,v,m)$ 'limita el empleo de traíllas y dúmperes'
 $E_DUMPERES(i,v,m)$
 $E_CAMIONES(i,j,m)$ 'limita el empleo de camiones a préstamos y vertederos'

$E_1_ORGANIZACION(i)$ 'mejora la organización de los equipos en obra'
 $E_2_ORGANIZACION(i)$
 $E_3_ORGANIZACION(i)$
 $E_4_ORGANIZACION(i)$

$E_1_DIAS(e,m)$ 'calcula el tiempo invertido en los trabajos'
 $E_2_DIAS(e,m)$
 $E_3_DIAS(e,m)$
 $E_4_DIAS(e,m)$


```
Model Mvto_tierras /all/;  
Solve Mvto_tierras using MIP minimizing Fobj;  
Display x.l, dias.l, diasp.l, xp.l, vpm.l, vp.l, xv.l, vvm.l, vv.l, ve.l,  
vmov.l, vado.l, vtp.l, vtv.l, Plazo.l;
```


Anexo B. El Modelo de Optimización: lectura desde un fichero.xlsx

```
$TITLE TFM Mvto Tierras: Ejemplo_3_ImportDatos, examen 27/06/2019
```

```
$onEcho > HowToRead.txt
```

```
dSet=i rng=B27 rdim=1
dSet=j rng=C26      cdim=1
dSet=v rng=U26      cdim=1
dSet=p rng=B46 rdim=1
dSet=e rng=C64 rdim=1
dSet=m rng=I6       cdim=1
par=dist rng=B26 rdim=1 cdim=1
par=distV rng=T26 rdim=1 cdim=1
par=distP rng=S45 rdim=1 cdim=1
par=Qd rng=H6 rdim=1 cdim=1
par=Qt rng=V6 rdim=1 cdim=1
par=Qv rng=G51 rdim=1
par=Qp rng=B51 squeeze=n rdim=1 cdim=1
par=canP rng=B57 rdim=1 cdim=1
par=canV rng=G57 rdim=1 cdim=1
par=ch rng=C63 rdim=1
par=cap rng=F63 rdim=1
par=vida rng=I63 rdim=1
par=vret rng=L63 rdim=1
par=tcarga rng=O63 rdim=1
par=tdesc rng=R63 rdim=1
par=fh rng=N50 dim=0
par=deco rng=N52 dim=0
par=jorn rng=N54 dim=0
par=mt rng=N56 dim=0
par=prodRetro rng=E70 dim=0
par=chRetro rng=E72 dim=0
```

```
$offEcho
```

```
$call gdxrw Datos_TFM_EJ_3.xlsx @HowToRead.txt
```

```
$gdxin Datos_TFM_EJ_3.gdx
```

```
set
```

```
i(*) 'Secciones en Desmonte'
j(*) 'Secciones en Relleno'
v(*) 'Vertederos'
p(*) 'Préstamos'
e(*) 'Equipos mecánicos'
```

m(*) 'Tierras';

\$load i j v p e m

display i,j,v,p,e,m;

Parameters

dist(i,j) 'distancias de excavación a relleno'

distV(i,v) 'distancias de excavación a vertedero'

distP(p,j) 'distancias de préstamo a relleno'

Qd(i,m) 'volumen disponible en excavación i'

Qt(j,m) 'volumen requerido en relleno j'

Qv(v) 'capacidad disponible en vertedero v'

Qp(p,m) 'capacidad disponible en préstamo p'

canv(v,m) 'canon €/m³E de material vertido'

canp(p,m) 'canon €/m³E de material de préstamo'

ch(e) 'coste horario de los equipos de transporte €/h'

cap(e) 'capacidad útil de transporte en m³E'

vida(e) 'velocidad en carga km/h'

vret(e) 'velocidad en vacío km/h'

tcarga(e) 'tiempo de carga min'

tdesc(e) 'tiempo de descarga y maniobras min';

Scalar

fh 'eficiencia horaria', deco 'distancia económica Traíllas', jorn 'horas al día', mt 'mototraíllas en obra', prodRetro 'rendimiento de la CAT365', chRetro 'coste horario de la CAT365';

\$load dist distV distP Qd Qt Qv Qp canv canp ch cap vida vret tcarga tdesc fh

deco jorn mt prodRetro chRetro

display dist, distV, distP, Qd, Qt, Qv, Qp, canv, canp, ch, cap, vida, vret, tcarga, tdesc fh, deco, jorn, mt, prodRetro, chRetro;

\$gdxin

**Tiempo(en minutos) para realizar un ciclo*

completo(carga+transporte+descarga+retorno)

Parameter Tc(e,i,j) 'Tiempo de ciclo de i a j';

Tc(e,i,j)=tcarga(e)+tdesc(e)+dist(i,j)*(60/1000)*(1/vida(e)+1/vret(e));

Parameter Tcv(e,i,v) 'Tiempo de ciclo a vertedero';

Tcv('e3',i,v)=tcarga('e3')+tdesc('e3')+distv(i,v)*(60/1000)*(1/vret('e3')+1/vret('e3'));

Parameter Tcp(e,p,j) 'Tiempo de ciclo desde préstamo';

Tcp('e3',p,j)=tcarga('e3')+tdesc('e3')+distp(p,j)*(60/1000)*(1/vret('e3')+1/vret('e3'));

**Equipos necesarios para que la maquinaria de carga trabaje sin pausa*

Parameter equip(e,i,j);

equip('e1',i,j)=round(Tc('e1',i,j)/tcarga('e1'));

equip('e2',i,j)=mt;

equip('e3',i,j)=round(Tc('e3',i,j)/tcarga('e3'));

Parameter equipv(e,i,v);

```
equipv('e3',i,v)=round(Tcv('e3',i,v)/tcarga('e3'));
Parameter equipp(e,p,j);
equipp('e3',p,j)=round(Tcp('e3',p,j)/tcarga('e3'));
```

```
Parameter produccion(e,i,j) 'Producción de las Mototraillas para cada trayecto';
produccion('e1',i,j)=prodRetro;
produccion('e3',i,j)=prodRetro;
produccion('e2',i,j)=mt*cap('e2')*fh/Tc('e2',i,j)*60;
```

**Costes unitarios de transporte en €/m3E de tierras acarreadas*

```
Parameter C(e,i,j) 'coste de transporte de i a j';
C('e1',i,j)=(equip('e1',i,j)*ch('e1')+chRetro)/prodRetro;
C('e2',i,j)=(equip('e2',i,j)*ch('e2'))/produccion('e2',i,j);
Parameter CV(e,i,v,m) 'coste de transporte a vertedero v';
CV('e3',i,v,m)=(equipv('e3',i,v)*ch('e3')+chRetro)/prodRetro;
Parameter CP(e,p,j,m) 'coste de adquisición en préstamo p';
CP('e3',p,j,m)=(equipp('e3',p,j)*ch('e3')+chRetro)/prodRetro;
```

**Resultado del Balance de tierras*

```
Parameter balance(m) 'balance de tierras en obra';
balance(m)=sum(i,Qd(i,m))-sum(j,Qt(j,m));
```

```
display balance, Tc, Tcv, Tcp, equip, equipv, equipp, C, CV, CP;
```

```
Scalar CS 'cota superior' /300000/, CI 'cota inferior' /0.001/;
```

Variable

```
Fobj          'Función Objetivo'
x(e,i,j,m)    'vol.Tierras de excavación i a relleno j en equipo e'
xv(e,i,v,m)   'vol.Tierras de excavación i a vertedero v en equipo e'
xp(e,p,j,m)   'vol.Tierras de préstamo p a relleno j'
vpm(p,m)      'Tierras adquiridas en préstamo p'
vp(m)         'Tierras a traer de préstamos'
vtp           'Volumen total adquirido en préstamos'
vvm(v,m)      'Tierras a vertedero v'
vv(m)         'Tierras llevadas a vertederos'
vtv           'Volumen total a vertederos'
vem(e,m)      'Tierras acarreadas en obra por equipos'
ve(e)         'Total tierras a acarrear por equipos'
vado          'Volumen a acarrear dentro de la obra'
vmov          'm3E tierras movidos en proyecto'
dias(e,m)     'duración de los trabajos de compensación de tierras dentro de la
traza, por equipo y material de excavación'
diasp(e,m)    'duración de los trabajos de compensación de tierras traídas de
préstamos'
sumadias(e)   'tiempo total en obra de cada equipo de trabajo'
plazo         'duración de los trabajos de MdT'
```

```
Y(i,j)       'var bin Y, 1 si la dist de i a j es > que la dist económica de
transporte de las traillas'
```

a(m) 'var bin a, 1 si el balance de tierras es positivo (para cada tipo de suelo)'
 z(m) 'var bin z, 1 si el balance de tierras es negativo'
 k(i) 'var bin k, 1 si dúmperes operan en la sección de desmonte i'
 r(i) 'var bin r, 1 si traíllas operan en la sección de desmonte i';

Positive variables x,xv,xp;

Binary variables Y,L,a,z,k,r;

Equations

E_obj 'define la Función Objetivo'
 E_voID(i,m) 'satisface balance de excavación i'
 E_voIT(j,m) 'satisface balance de relleno j'
 E_capP(p,m) 'satisface limitación capacidad en préstamos'
 E_capV(v) 'satisface limitación capacidad en vertederos'
 E_vpm(p,m) 'Tierras adquiridas en préstamo p'
 E_vp(m) 'Tierras a traer de préstamos'
 E_vtp 'Volumen total de préstamos'
 E_vvm(v,m) 'Tierras a vertedero v'
 E_vv(m) 'Tierras llevadas a vertederos'
 E_vtv 'Volumen total a vertederos'
 E_vem(e,m) 'Tierras acarreadas en obra por equipos'
 E_ve(e) 'Total tierras a acarrear por equipos'
 E_vado 'Volumen a acarrear dentro de la obra'
 E_vmov 'm3E tierras movidos en proyecto'

E_1_BALANCE(m) 'prioriza el aprovechamiento de las tierras de excavación'
 E_2_BALANCE(m)
 E_3_BALANCE(m)
 E_4_BALANCE(m)

E_1_TRAILLAS(i,j) 'satisface las distancias económicas de transporte de las mototraíllas'
 E_2_TRAILLAS(i,j)

E_TRAILLAS(i,v,m) 'limita el empleo de traíllas y dúmperes'
 E_DUMPERES(i,v,m)
 E_CAMIONES(i,j,m) 'limita el empleo de camiones a préstamos y vertederos'

E_1_ORGANIZACION(i) 'mejora la organización de los equipos en obra'
 E_2_ORGANIZACION(i)
 E_3_ORGANIZACION(i)
 E_4_ORGANIZACION(i)

E_1_DIAS(e,m) 'calcula el tiempo invertido en los trabajos'
 E_2_DIAS(e,m)
 E_3_DIAS(e,m)
 E_4_DIAS(e,m)

```

E_5_DIAS(e)
E_PLAZO          'Duración estimada de los trabajos de MdT';
E_objj..
Fobjj=e=sum((e,i,j,m),x(e,i,j,m)*C(e,i,j))+sum((e,i,v,m),xv(e,i,v,m)*CV(e,i,v,m))
              +sum((p,j,m),xp('e3',p,j,m)*CP('e3',p,j,m));

E_volD(i,m)..    sum((e,j),x(e,i,j,m))+sum((e,v),xv(e,i,v,m))=e=QD(i,m);
E_volT(j,m)..    sum((e,i),x(e,i,j,m))+sum(p,xp('e3',p,j,m))=e=QT(j,m);
E_capP(p,m)..    sum(j,xp('e3',p,j,m))=l=QP(p,m);
E_capV(v)..      sum((e,i,m),xv(e,i,v,m))=l=QV(v);
E_vpm(p,m)..     sum(j,xp('e3',p,j,m))=e=vpm(p,m);
E_vp(m)..        sum(p,vpm(p,m))=e=vp(m);
E_vtp..          sum(m,vp(m))=e=vtp;
E_vvm(v,m)..     sum(i,xv('e3',i,v,m))=e=vvm(v,m);
E_vv(m)..        sum(v,vvm(v,m))=e=vv(m);
E_vtv..          sum(m,vv(m))=e=vtv;
E_vem(e,m)..     sum((i,j),x(e,i,j,m))=e=vem(e,m);
E_ve(e)..        sum(m,vem(e,m))=e=ve(e);
E_vado..         sum(e,ve(e))=e=vado;
E_vmov..         vado+vtp+vtv=e=vmov;

E_1_BALANCE(m)..    balance(m)=l=CS*a(m)-CI;
E_2_BALANCE(m)..    sum((p,j),xp('e3',p,j,m))=l=CS*(1-a(m));
E_3_BALANCE(m)..    -balance(m)=l=CS*z(m);
E_4_BALANCE(m)..    sum((p,j),xp('e3',p,j,m))=l=-balance(m)+CS*(1-z(m));

E_1_TRAILLAS(i,j)..  dist(i,j)=l=deco+CS*Y(i,j);
E_2_TRAILLAS(i,j)..  sum(m,x('e2',i,j,m))=l=CS*(1-Y(i,j));

E_TRAILLAS(i,v,m)..  xv('e1',i,v,m)=e=0;
E_DUMPERES(i,v,m)..  xv('e2',i,v,m)=e=0;
E_CAMIONES(i,j,m)..  x('e3',i,j,m)=e=0;

E_1_ORGANIZACION(i)..  sum((j,m),x('e1',i,j,m))=l=CS*k(i);
E_2_ORGANIZACION(i)..  sum((j,m),x('e2',i,j,m))+sum((v,m),xv('e2',i,v,m))=l=CS*(1-k(i));
E_3_ORGANIZACION(i)..  sum((j,m),x('e2',i,j,m))=l=CS*r(i);
E_4_ORGANIZACION(i)..  sum((j,m),x('e1',i,j,m))+sum((v,m),xv('e1',i,v,m))=l=CS*(1-r(i));

E_1_DIAS(e,m)..     dias('e1',m)=e=sum((i,j),x('e1',i,j,m))/prodRetro/jorn;
E_2_DIAS(e,m)..     dias('e2',m)=e=sum((i,j),x('e2',i,j,m))/produccion('e2',i,j))/jorn;
E_3_DIAS(e,m)..     dias('e3',m)=e=sum((i,v),xv('e3',i,v,m))/prodRetro/jorn;
E_4_DIAS(e,m)..     diasp(e,m)=e=sum((p,j),xp(e,p,j,m))/prodRetro/jorn;
E_5_DIAS(e)..       sum(m,dias(e,m)+diasp(e,m))=e=sumadias(e);
E_PLAZO..          sum(e,sumadias(e))=e=plazo;

```

Model Mvto_tierras /all/;

```
Solve Mvto_tierras using MIP minimizing Fobj;  
Display x.l, dias.l, diasp.l, xp.l, vpm.l, vp.l, xv.l, vvm.l, vv.l, ve.l,  
vmov.l, vado.l, vtp.l, vtv.l, Plazo.l;  
execute_unload 'Sol_TFM_EJ_3.gdx', x.l xp.l xv.l;
```


Anexo C. El Modelo de Optimización aplicado a la Variante de las Cabezas

```
$TITLE TFM Mvto Tierras: Vte de Las Cabezas_ImportDatos
```

```
$onEcho > HowToRead.txt
```

```
dSet=i rng=B13 rdim=1  
dSet=j rng=H13 rdim=1  
dSet=v rng=CC12 cdim=1  
dSet=p rng=B82 rdim=1  
dSet=e rng=R92 rdim=1  
dSet=m rng=C12 cdim=1  
par=dist rng=N12 rdim=1 cdim=1  
par=distV rng=CB12 rdim=1 cdim=1  
par=distP rng=N81 rdim=1 cdim=1  
par=Qd rng=B12 rdim=1 cdim=1  
par=Qt rng=H12 squeeze=n rdim=1 cdim=1  
par=Qv rng=H81 rdim=1 cdim=1  
par=Qp rng=B81 squeeze=n rdim=1 cdim=1  
par=canP rng=B92 rdim=1 cdim=1  
par=canV rng=H92 rdim=1 cdim=1  
par=ch rng=O91 rdim=1  
par=vida rng=R91 rdim=1  
par=vret rng=U91 rdim=1  
par=tcarga rng=X91 rdim=1  
par=tdesc rng=AA91 rdim=1  
par=tman rng=AD91 rdim=1  
par=fh rng=E98 dim=0  
par=jorn rng=E100 dim=0  
par=numPalas rng=E104 dim=0  
par=numBull rng=E104 dim=0  
par=deco rng=E106 dim=0  
par=chPala rng=E108 dim=0  
par=prodPala rng=H107 rdim=1  
par=CS rng=E110 dim=0  
par=CI rng=E112 dim=0  
$offEcho
```

```
$call gdxrw Datos_VARIANTE.xlsx @HowToRead.txt
```

```
$gdxin Datos_VARIANTE.gdx
```

```
set
```

```
i(*) 'Secciones en Desmonte'
```

```
j(*) 'Secciones en Relleno'
```

```
v(*) 'Vertederos'  
p(*) 'Préstamos'  
e(*) 'Equipos mecánicos'  
m(*) 'Tierras';
```

```
$load i j v p e m  
display i,j,v,p,e,m;
```

Parameters

```
dist(i,j) 'distancias de excavación a relleno'  
distV(i,v) 'distancias de excavación a vertedero'  
distP(p,j) 'distancias de préstamo a relleno'  
Qd(i,m) 'volumen disponible en excavación i'  
Qt(j,m) 'volumen requerido en relleno j'  
Qv(v,m) 'capacidad disponible en vertedero v'  
Qp(p,m) 'capacidad disponible en préstamo p'  
canv(v,m) 'canon €/m3E de material vertido'  
canp(p,m) 'canon €/m3E de material de préstamo'  
ch(e) 'coste horario de los equipos de transporte €/h'  
vida(e) 'velocidad en carga km/h'  
vret(e) 'velocidad en vacío km/h'  
tcarga(e) 'tiempo de carga min'  
tdesc(e) 'tiempo de descarga min'  
tman(e) 'tiempo de espera y maniobras'  
prodPala(m) 'Producción de la pala';
```

Scalar

```
fh 'eficiencia horaria', jorn 'horas al día', numPalas 'número de cargadoras en obra', numBull 'número de bulldózeres en obra',  
deco 'distancia económica de los bulldóceres', chPala 'Ch de la Pala cargadora',  
CS 'cota superior', CI 'cota inferior'
```

```
$load dist distV distP Qd Qt Qv Qp canv canp ch vida vret tcarga tdesc tman fh  
jorn prodPala numPalas numBull deco chPala CS CI  
display dist, distV, distP, Qd, Qt, Qv, Qp, canv, canp, ch, vida, vret, tcarga,  
tdesc, tman, fh, jorn, prodPala, numPalas, numBull, deco, chPala, CS, CI;  
$gdxin
```

**Tiempo de un ciclo completo de trabajo en minutos
(carga+transporte+descarga+retorno)*

Parameter Tc(e,i,j) 'Tiempo de ciclo de i a j';

Tc(e,i,j)=tcarga(e)+tdesc(e)+tman(e)+dist(i,j)*(60/1000)*(1/vida(e)+1/vret(e));

Parameter Tcv(e,i,v) 'Tiempo de ciclo a vertedero';

Tcv(e,i,v)=tcarga(e)+tdesc(e)+tman(e)+distv(i,v)*(60/1000)*(1/vret(e)+1/vret(e));
;

Parameter Tcp(e,p,j) 'Tiempo de ciclo desde préstamo';

Tcp('e1',p,j)=tcarga('e1')+tdesc('e1')+tman('e1')+distp(p,j)*(60/1000)*(1/vret('e1')+1/vret('e1'));

**Estimación de Los equipos necesarios para que La excavación no pare*

Parameter equip(e,i,j);
 equip('e1',i,j)=Tc('e1',i,j)/tcarga('e1');
 equip('e2',i,j)=Tc('e2',i,j)/tcarga('e2');
 equip('e3',i,j)=numBull;
Parameter equipv(e,i,v);
 equipv('e1',i,v)=Tcv('e1',i,v)/tcarga('e1');
 equipv('e2',i,v)=Tcv('e2',i,v)/tcarga('e2');
Parameter equipp(e,p,j);
 equipp('e1',p,j)=Tcp('e1',p,j)/tcarga('e1');

**Rendimiento de Los equipos de excavación*

Parameter produccion(m) 'rendimiento de la excavación (m3E/h)';
 produccion(m)=prodPala(m)*numPalas*fh;

**Costes asociados al transporte*

Parameter C(e,i,j,m) 'coste de transporte de i a j (€/m3E)';
 C('e1',i,j,m)=(equip('e1',i,j)*ch('e1')+chPala*numPalas+ch('e3')*numBull)/produccion(m);
 C('e2',i,j,m)=(equip('e2',i,j)*ch('e2')+chPala*numPalas+ch('e3')*numBull)/produccion(m);
 C('e3',i,j,m)=(equip('e3',i,j)*ch('e3')+chPala*numPalas)/produccion(m);
Parameter CV(e,i,v,m) 'coste de transporte a vertedero v (€/m3E)';
 CV('e1',i,v,m)=(equipv('e1',i,v)*ch('e1')+chPala*numPalas+ch('e3')*numBull)/produccion(m)+canv(v,m);
 CV('e2',i,v,m)=(equipv('e2',i,v)*ch('e2')+chPala*numPalas+ch('e3')*numBull)/produccion(m)+canv(v,m);
Parameter CP(e,p,j,m) 'coste de adquisición en préstamo p (€/m3E)';
 CP('e1',p,j,m)=equipp('e1',p,j)*ch('e1')/prodPala(m)/fh+canp(p,m);

**Balance de Las tierras disponibles para su empleo en rellenos*

Parameter balance(m) 'balance de tierras en obra';
 balance(m)=sum(i,Qd(i,m))-sum(j,Qt(j,m));

display balance, produccion, Tc, Tcv, Tcp, equip, equipv, equipp, C, CV, CP;

Variable

Fobj	'Función Objetivo'
x(e,i,j,m)	'volumen de tierras m transportadas de desmonte i a terraplenado j en equipo e'
xv(e,i,v,m)	'vol.tierras m transportadas de desmonte i a vertedero v en equipo e'
xp(e,p,j,m)	'vol.tierras m adquiridas del préstamo p y llevadas al punto de relleno j'
vpm(p,m)	'Tierras m adquiridas del préstamo p'
vp(m)	'Volumen de tierras m adquirido de préstamos'
vtp	'Volumen total adquirido de préstamos'
vvem(e,v,m)	'Volumen de tierras m llevado a vertedero v por cada equipo e'
vvm(v,m)	'Volumen de tierras m llevado a cada vertedero v'
vv(m)	'Volumen de tierras m llevado a vertederos'

vtv 'Volumen total de material sobrante'
 vem(e,m) 'Volumen de tierras m acarreado en obra por cada equipo e'
 ve(e) 'Volumen total tierras transportado por cada equipo dentro de la traza'
 vado 'Volumen total acarreado dentro de la obra'
 vmov 'metros cúbicos de tierras esponjadas movidos en el proyecto'
 dias(e,m) 'duración de los trabajos de compensación de tierras dentro de la traza'
 diasp(e,m) 'duración de los trabajos de compensación de tierras traídas de préstamos'
 sumadias(e) 'tiempo total en obra de cada equipo de trabajo'
 plazo 'duración de los trabajos de MdT'
 Y(i,j) 'var bin Y, =1 si la distancia de i a j es > que la distancia económica de transporte de los Buldóceres'
 a(m) 'var bin a, =1 si el balance de tierras es positivo (para cada tipo de suelo)'
 z(m) 'var bin z, =1 si el balance de tierras es negativo'
 k(i) 'var bin k, =1 si dúmperes operan en la sección de desmorte i'
 r(i) 'var bin r, =1 si traíllas operan en la sección de desmorte i'
 s(i,j) 'var bin s, =1 si $d(i,j) < 100$ ';

Positive variables

x,xv,xp;

Binary variables

Y,a,z,k,r,s;

Equations

E_OBJ 'define la Función Objetivo'
 E_vold(i,m) 'satisface el balance de excavación en i'
 E_volt(j,m) 'satisface el balance de relleno en j'
 E_capP(p,m) 'satisface la limitación de capacidad en préstamos'
 E_capV(v,m) 'satisface la limitación de capacidad en vertederos'
 E_vpm(p,m) 'Tierras m adquiridas en préstamo p'
 E_vp(m) 'Tierras m adquiridas de préstamos'
 E_vtp 'Volumen total de tierras traídas de préstamos'
 E_vvem(e,v,m) 'Tierras m depositadas en vertedero v por equipos'
 E_vvm(v,m) 'Tierras m llevadas a vertedero v'
 E_vv(m) 'Total de tierras m llevadas a vertederos'
 E_vtv 'Volumen total de tierras a vertederos'
 E_vem(e,m) 'Tierras acarreadas dentro de la obra por equipos'
 E_ve(e) 'Total de tierras acarreadas por equipos'
 E_vado 'Volumen total acarreado dentro de la obra'
 E_vmov 'm³E de tierras movidos en proyecto'

 E_CAMION12Tn(p,j,m) 'Los camiones de 12tn no se utilizan para traer tierras de préstamos'
 E_BULp(p,j,m) 'Los buldóceres no se emplean para traer tierras de préstamos'

E_BULv(i,v,m) 'Los buldóceres no se emplean para llevar tierras a vertederos'
 E_1_DIST(i,j) 'Distancia económica de transporte de los buldóceres'
 E_2_DIST(i,j)
 E_1_BULDOZER(i,j) 'Se emplean buldóceres en la compensación de los perfiles a media ladera'
 E_2_BULDOZER(i,j)
 E_3_BULDOZER(i,j)
 E_4_BULDOZER(i,j)

E_1_BALANCE(m) 'prioriza el aprovechamiento de las tierras disponibles de la excavación'
 E_2_BALANCE(m)
 E_3_BALANCE(m)
 E_4_BALANCE(m)

E_1_ORGANIZACION(i) 'mejora la organización de los equipos en el trazado'
 E_2_ORGANIZACION(i)
 E_3_ORGANIZACION(i)
 E_4_ORGANIZACION(i)

E_1_DIAS(e,m) 'define el tiempo invertido por los equipos en la realización de los trabajos'
 E_2_DIAS(e,m)
 E_3_DIAS(e)
 E_PLAZO 'Duración estimada de los trabajos de MdT';

E_OBJ..
 Fobj=e= $\text{sum}((e,i,j,m),x(e,i,j,m)*C(e,i,j,m))+\text{sum}((e,i,v,m),xv(e,i,v,m)*CV(e,i,v,m)))+\text{sum}((p,j,m),xp('e1',p,j,m)*CP('e1',p,j,m));$
 E_volD(i,m).. $\text{sum}((e,j),x(e,i,j,m))+\text{sum}((e,v),xv(e,i,v,m))=e=QD(i,m);$
 E_volT(j,m).. $\text{sum}((e,i),x(e,i,j,m))+\text{sum}(p,xp('e1',p,j,m))=e=QT(j,m);$
 E_capP(p,m).. $\text{sum}(j,xp('e1',p,j,m))=l=QP(p,m);$
 E_capV(v,m).. $\text{sum}((e,i),xv(e,i,v,m))=l=QV(v,m);$
 E_vpm(p,m).. $\text{sum}(j,xp('e1',p,j,m))=e=vpm(p,m);$
 E_vp(m).. $\text{sum}(p,vpm(p,m))=e=vp(m);$
 E_vtp.. $\text{sum}(m,vp(m))=e=vtp;$
 E_vvem(e,v,m).. $\text{sum}(i,xv(e,i,v,m))=e=vvem(e,v,m);$
 E_vvm(v,m).. $\text{sum}(e,vvem(e,v,m))=e=vvm(v,m);$
 E_vv(m).. $\text{sum}(v,vvm(v,m))=e=vv(m);$
 E_vtv.. $\text{sum}(m,vv(m))=e=vtv;$
 E_vem(e,m).. $\text{sum}((i,j),x(e,i,j,m))=e=vem(e,m);$
 E_ve(e).. $\text{sum}(m,vem(e,m))=e=ve(e);$
 E_vado.. $\text{sum}(e,ve(e))=e=vado;$
 E_vmov.. $vado+vtp+vtv=e=vmov;$

E_CAMION12Tn(p,j,m).. $xp('e2',p,j,m)=e=0;$
 E_BULp(p,j,m).. $xp('e3',p,j,m)=e=0;$
 E_BULv(i,v,m).. $xv('e3',i,v,m)=e=0;$

```

E_1_DIST(i,j).. dist(i,j)=l=deco+CS*Y(i,j);
E_2_DIST(i,j).. sum(m,x('e3',i,j,m))=l=CS*(1-Y(i,j));

E_1_BULDOZER(i,j).. dist(i,j)=l=100+CS*(1-s(i,j));
E_2_BULDOZER(i,j).. dist(i,j)=g=100*(1-s(i,j));
E_3_BULDOZER(i,j).. sum(m,x('e1',i,j,m)+x('e2',i,j,m))=l=CS*(1-s(i,j));
E_4_BULDOZER(i,j).. sum(m,x('e1',i,j,m)+x('e2',i,j,m))=l=CS*(1-s(i,j));

E_1_BALANCE(m).. balance(m)=l=CS*a(m)-CI;
E_2_BALANCE(m).. sum((p,j),xp('e1',p,j,m))=l=CS*(1-a(m));
E_3_BALANCE(m).. -balance(m)=l=CS*z(m);
E_4_BALANCE(m).. sum((p,j),xp('e1',p,j,m))=l=-balance(m)+CS*(1-z(m));

E_1_ORGANIZACION(i).. sum((j,m),x('e1',i,j,m))=l=CS*k(i);
E_2_ORGANIZACION(i)..
sum((j,m),x('e2',i,j,m))+sum((v,m),xv('e2',i,v,m))=l=CS*(1-k(i));
E_3_ORGANIZACION(i).. sum((j,m),x('e2',i,j,m))=l=CS*r(i);
E_4_ORGANIZACION(i)..
sum((j,m),x('e1',i,j,m))+sum((v,m),xv('e1',i,v,m))=l=CS*(1-r(i));

E_1_DIAS(e,m)..
dias(e,m)=e=(sum((i,j),x(e,i,j,m))+sum((i,v),xv(e,i,v,m)))/produccion(m)/jorn;
E_2_DIAS(e,m).. dias(e,m)=e=sum((p,j),xp(e,p,j,m))/prodPala(m)/fh/jorn;
E_3_DIAS(e).. sum(m,dias(e,m)+diasp(e,m))=e=sumadias(e);
E_PLAZO.. sum(e,sumadias(e))=e=plazo;

Model Mvto_tierras /all/;
Solve Mvto_tierras using MIP minimizing Fobj;
Display x.l, dur.l, duracion.l, dias.l, diasp.l, sumadias.l, xp.l, vpm.l, vp.l,
xv.l, vvem.l, vvm.l, vv.l, ve.l, vmov.l, vado.l, vtp.l, vtv.l, plazo.l;
execute_unload 'Sol_VARIANTE.gdx', x.l xp.l xv.l;

```


Anexo D. Resultados Obtenidos.

Variante de Las Cabezas

TRONCO DE LA VARIANTE DE LAS CABEZAS

GAMS 41.3.0 0f17a8d6 Nov 28, 2022 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/22 18:23:08 Page 7
TFM Mvto Tierras: Vte de las Cabezas_ImportDatos
Model Statistics SOLVE Mvto_tierras Using MIP From line 239

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	37	SINGLE EQUATIONS	24,305
BLOCKS OF VARIABLES	25	SINGLE VARIABLES	43,309
NON ZERO ELEMENTS	299,549	DISCRETE VARIABLES	7,558

GENERATION TIME = 3.547 SECONDS 26 MB 41.3.0 0f17a8d6 WEX-WEI
GAMS 41.3.0 0f17a8d6 Nov 28, 2022 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/22 18:23:08 Page 8
TFM Mvto Tierras: Vte de las Cabezas_ImportDatos
Solution Report SOLVE Mvto_tierras Using MIP From line 239

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	Mvto_tierras	OBJECTIVE	Fobj
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	239

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 8 Integer Solution
**** OBJECTIVE VALUE 1198394.6852

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.328 10000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT 421 2147483647
--- GAMS/Cplex Link licensed for continuous and discrete problems.
--- GMO setup time: 0.00s
--- Space for names approximately 1.63 Mb
--- Use option 'names no' to turn use of names off
--- GMO memory 21.81 Mb (peak 22.14 Mb)
--- Dictionary memory 0.00 Mb
--- Cplex 22.1.0.0 link memory 1.10 Mb (peak 6.66 Mb)
--- Starting Cplex

--- MIP status (102): integer optimal, tolerance.
--- Cplex Time: 0.25sec (det. 104.95 ticks)

--- Fixing integer variables and solving final LP...

--- Fixed MIP status (1): optimal.
--- Cplex Time: 0.06sec (det. 44.55 ticks)

Solution satisfies tolerances

MIP Solution: 1198394.685164 (421 iterations, 0 nodes)

Final Solve: 1198394.685164 (160 iterations)

Best possible: 1198394.182161

Absolute gap: 0.503003

Relative gap: 0.000000

GAMS 41.3.0 0f17a8d6 Nov 28, 2022 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/22 18:23:08 Page 9

TFM Mvto Tierras: Vte de las Cabezas_ImportDatos

E x e c u t i o n

---- 240 VARIABLE x.L volumen de tierras m transportadas de desmonte i a terraplado j en equipo e

INDEX 1 = e1

m1

i1.j24	1290.980
i2.j24	5696.000
i3.j24	3072.000
i4.j2	1253.410
i4.j24	1938.590
i6.j16	1536.868
i6.j18	2407.070
i6.j22	1208.387
i6.j24	1466.675
i7.j22	1917.093
i9.j9	685.938
i9.j16	842.202
i10.j9	190.881
i10.j23	3616.990
i10.j25	4186.129
i11.j9	5135.870
i11.j21	2117.130
i12.j9	4989.980
i12.j10	6.020
i13.j21	237.130
i20.j17	1291.630
i20.j19	78.040
i20.j20	9.630
i20.j25	598.700
i21.j24	5450.000
i22.j24	2493.000
i40.j32	16812.000
i41.j32	5713.891
i41.j39	3542.570
i41.j40	110.180
i42.j32	897.000

i46.j32 487.000
 i47.j32 1886.410
 i47.j37 6252.180
 i47.j38 3980.140
 i47.j44 3571.970
 i47.j45 1566.190
 i47.j48 6160.110
 i48.j32 8806.300
 i48.j34 541.810
 i48.j35 1047.740
 i48.j36 855.050
 i48.j42 1491.350
 i48.j46 1774.350
 i48.j49 5943.400
 i49.j32 19971.360
 i49.j43 9580.320
 i49.j47 11657.320
 i50.j33 8752.580
 i50.j48 1274.610
 i50.j57 1624.500
 i50.j58 3125.930
 i50.j59 1534.550
 i50.j60 3.140

INDEX 1 = e3

m1

i1 .j1 0.020
 i7 .j3 11.907
 i9 .j7 62.860
 i13.j8 21.870
 i41.j41 736.359
 i50.j56 3.690

---- 240 VARIABLE dias.L duración de los trabajos de compensación de tierras dentro de la traza

m1 m3

e1 87.827 110.618
 e3 0.402

---- 240 VARIABLE diasp.L duración de los trabajos de compensación de tierras traídas de préstamos

m1 m2

e1 31.200 76.106

---- 240 VARIABLE sumadias.L tiempo total en obra de cada equipo de trabajo

e1 305.751, e3 0.402

---- 240 VARIABLE xp.L vol.tierras m adquiridas del préstamo p y llevadas al punto de relleno j

INDEX 1 = e1

	m1	m2
p1.j25	67.531	
p1.j26	4278.640	
p1.j27	3328.730	
p1.j28	3941.190	
p1.j29	16120.095	
p1.j30	11934.170	
p1.j31	10397.490	
p1.j32	14827.153	
p2.j1		15399.350
p2.j3		3418.670
p2.j4		7857.780
p2.j5		1451.570
p2.j6		13052.260
p2.j7		2959.460
p2.j11		866.820
p2.j12		3166.760
p2.j13		4686.061
p2.j14		3918.730
p2.j15		2159.170
p2.j49		18071.320
p2.j50		24069.900
p2.j51		9921.740
p2.j52		820.170
p2.j53		32.467
p2.j54		984.143
p2.j55		2615.946
p2.j56		96.093
p2.j61		822.100
p2.j62		1701.710
p2.j63		653.260

---- 240 VARIABLE vpm.L Tierras m adquiridas del préstamo p

	m1	m2
p1	64894.999	
p2		118725.480

---- 240 VARIABLE vp.L Volumen de tierras m adquirido de préstamos

m1 64894.999, m2 118725.480

---- 240 VARIABLE xv.L vol.tierras m transportadas de desmonte i a vertedero v en equipo e

INDEX 1 = e1

	m3
il .v1	2390.000

i2.v1	4659.000
i3.v1	2346.000
i4.v1	2128.000
i5.v1	639.000
i6.v1	2191.000
i7.v1	796.000
i8.v1	192.000
i9.v1	741.000
i10.v1	1998.000
i11.v1	1813.000
i12.v1	1249.000
i13.v1	818.000
i14.v1	2793.000
i15.v1	5735.000
i16.v1	2839.000
i17.v1	92135.000
i18.v1	9.000
i19.v1	370.000
i20.v1	3109.000
i21.v1	8210.000
i22.v1	5993.000
i23.v1	1724.000
i24.v1	93.000
i25.v1	1008.000
i26.v1	2921.000
i27.v1	593.000
i28.v1	1133.000
i29.v1	69.000
i30.v1	50.000
i31.v1	256.000
i32.v1	1044.000
i33.v1	1579.000
i34.v1	2777.000
i35.v1	623.000
i36.v1	84.000
i37.v1	117.000
i38.v1	531.000
i39.v1	1406.000
i40.v1	4592.000
i41.v1	2649.000
i42.v1	797.000
i43.v1	229.000
i44.v1	682.000
i45.v1	1116.000
i46.v1	1447.000
i47.v1	5854.000
i48.v1	5278.000
i49.v1	10303.000
i50.v1	4880.000
i51.v1	204.000
i52.v1	12.000
i53.v1	31.000
i54.v1	1465.000
i55.v1	682.000
i56.v1	77.000
i57.v1	162.000
i58.v1	1301.000

i59.v1 403.000

---- 240 VARIABLE vvem.L Volumen de tierras m llevado a vertedero v por cada equipo e
m3

e1.v1 201325.000

---- 240 VARIABLE vvm.L Volumen de tierras m llevado a cada vertedero v
m3

v1 201325.000

---- 240 VARIABLE vv.L Volumen de tierras m llevado a vertederos
m3 201325.000

---- 240 VARIABLE ve.L Volumen total tierras transportado por cada equipo dentro de la traza
e1 182680.294, e3 836.706

---- 240 VARIABLE vmov.L = 568462.479 metros cúbicos de tierras esponjadas movidos en el
proyecto
VARIABLE vado.L = 183517.000 Volumen total acarreado dentro de la obra
VARIABLE vtp.L = 183620.479 Volumen total adquirido de préstamos
VARIABLE vtv.L = 201325.000 Volumen total de material sobrante
VARIABLE plazo.L = 306.153 duración de los trabajos de MdT

EXECUTION TIME = 5.359 SECONDS 26 MB 41.3.0

GAMS 41.3.0 0f17a8d6 Nov 28, 2022 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/22 18:11:02 Page 7

TFM Mvto Tierras: TFM_CAMINOS

Model Statistics SOLVE Mvto_tierras Using MIP From line 243

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	31	SINGLE EQUATIONS	9,480
BLOCKS OF VARIABLES	20	SINGLE VARIABLES	23,540
NON ZERO ELEMENTS	187,318	DISCRETE VARIABLES	2,724

GENERATION TIME = 2.625 SECONDS 17 MB 41.3.0 0f17a8d6 WEX-WEI

GAMS 41.3.0 0f17a8d6 Nov 28, 2022 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/22 18:11:02 Page 8

TFM Mvto Tierras: TFM_CAMINOS

Solution Report SOLVE Mvto_tierras Using MIP From line 243

S O L V E S U M M A R Y

MODEL Mvto_tierras OBJECTIVE Fobj
 TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER CPLEX FROM LINE 243

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion

**** MODEL STATUS 8 Integer Solution

**** OBJECTIVE VALUE 249920.1904

RESOURCE USAGE, LIMIT 0.578 10000000000.000

ITERATION COUNT, LIMIT 62 2147483647

--- GAMS/Cplex Link licensed for continuous and discrete problems.

--- GMO setup time: 0.00s

--- Space for names approximately 0.78 Mb

--- Use option 'names no' to turn use of names off

--- GMO memory 12.83 Mb (peak 13.01 Mb)

--- Dictionary memory 0.00 Mb

--- Cplex 22.1.0.0 link memory 0.56 Mb (peak 3.74 Mb)

--- Starting Cplex

--- MIP status (102): integer optimal, tolerance.

--- Cplex Time: 0.31sec (det. 46.20 ticks)

--- Fixing integer variables and solving final LP...

--- Fixed MIP status (1): optimal.

--- Cplex Time: 0.17sec (det. 22.88 ticks)

Solution satisfies tolerances

MIP Solution: 249920.190412 (62 iterations, 0 nodes)

Final Solve: 249920.190412 (6 iterations)

Best possible: 249900.108104

Absolute gap: 20.082309

Relative gap: 0.000080

GAMS 41.3.0 0f17a8d6 Nov 28, 2022

WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 12/03/22 18:11:02 Page 9

TFM Mvto Tierras: TFM_CAMINOS

Execution

---- 244 VARIABLE x.L vol.Tierras de excavación i a relleno j en equipo e

INDEX 1 = e1

m1

i21.c11 1561.000

i21.c12 3025.000

i39.c11 3097.000

i39.c13 1210.000

i39.c14 1321.000

INDEX 1 = e2

m1

i7 .c4 341.000
i9 .c5 1311.000
i13.c6 1175.000
i19.c7 291.000
i20.c7 989.000
i20.c8 833.000
i22.c9 2847.000
i22.c10 1986.000
i23.c9 1785.000
i38.c15 1206.000
i40.c15 391.000
i40.c16 1165.000
i46.c18 1563.000
i46.c19 1375.000
i50.c21 1152.000
i50.c22 360.000

INDEX 1 = e3

m1

i3 .c1 447.000
i6 .c2 2145.000
i7 .c3 18.000
i42.c17 1267.000
i48.c20 651.000

---- 244 VARIABLE dias.L

m1 m4 m5

e1 4.911 14.960 10.742
e2 9.024 14.960 10.742
e3 2.177 14.960 10.742

---- 244 VARIABLE sumadias.L

e1 30.612, e2 34.726, e3 27.879

---- 244 VARIABLE xp.L vol.Tierras de préstamo p a relleno j

INDEX 1 = e1

	m4	m5
p1.c1	358.000	
p1.c2	789.000	
p1.c3	262.000	
p1.c4	559.000	
p1.c5	922.000	
p1.c6	793.000	
p1.c7	723.000	
p1.c8	825.000	
p1.c9	3259.000	
p1.c10	1961.000	
p1.c11	2385.000	
p1.c12	1754.000	
p1.c13	835.000	
p1.c14	1007.000	
p1.c15	1097.000	
p1.c16	1131.000	
p1.c17	588.000	
p1.c18	1234.000	
p1.c19	1057.000	
p1.c20	521.000	
p1.c21	838.000	
p1.c22	440.000	
p3.c1		255.000
p3.c2		557.000
p3.c3		187.000
p3.c4		406.000
p3.c5		657.000
p3.c6		558.000
p3.c7		689.000

p3.c8	587.000
p3.c9	2312.000
p3.c10	1400.000
p3.c11	1674.000
p3.c12	1245.000
p3.c13	590.000
p3.c14	717.000
p3.c15	779.000
p3.c16	811.000
p3.c17	421.000
p3.c18	874.000
p3.c19	750.000
p3.c20	365.000
p3.c21	591.000
p3.c22	332.000

---- 244 VARIABLE vpm.L Tierras adquiridas en préstamo p

m4 m5

p1 23338.000

p3 16757.000

---- 244 VARIABLE vp.L Tierras a traer de préstamos

m4 23338.000, m5 16757.000

---- 244 VARIABLE vtp.L = 40095.000 Volumen total adquirido en préstamos

---- 244 VARIABLE vem.L Tierras acarreadas en obra por equipos

m1

e1 10214.000

e2 18770.000

e3 4528.000

---- 244 VARIABLE ve.L Total tierras a acarrear por equipos dentro de la traza

e1 10214.000, e2 18770.000, e3 4528.000

---- 244 VARIABLE vmov.L = 73607.000 m3E tierras movidos en proyecto
VARIABLE vado.L = 33512.000 Volumen a acarrear dentro de la obra
VARIABLE vtp.L = 40095.000 Volumen total adquirido en préstamos
VARIABLE plazo.L = 93.217 duración de los trabajos de MdT

---- 244 VARIABLE Qfdes.L Volumen de excavación disponibles en zonas de desmonte tras realizar el terraplenado de los caminos

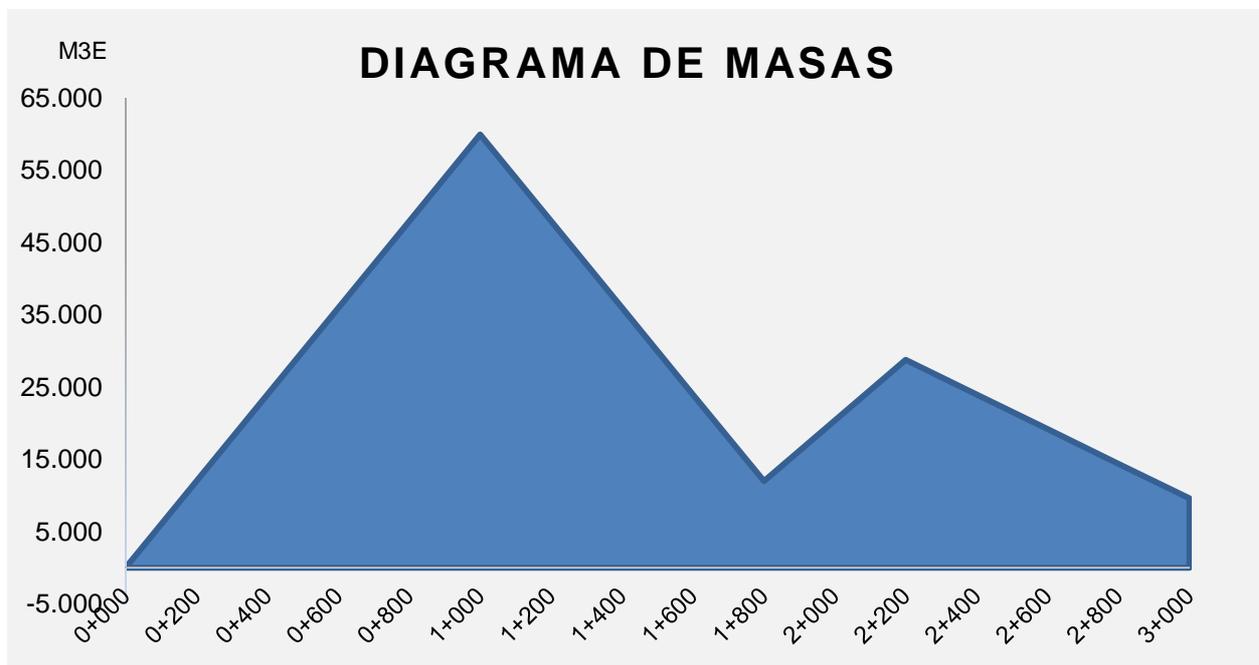
	m1	m3
i1	1291.000	2390.000
i2	5696.000	4659.000
i3	3072.000	2346.000
i4	3192.000	2128.000
i5		639.000
i6	6619.000	2191.000
i7	1929.000	796.000
i8		192.000
i9	1591.000	741.000
i10	7994.000	1998.000
i11	7253.000	1813.000
i12	4996.000	1249.000
i13	259.000	818.000
i14		2793.000
i15		5735.000
i16		2839.000
i17		92135.000
i18		9.000
i19		370.000
i20	1978.000	3109.000
i21	5450.000	8210.000
i22	2493.000	5993.000
i23		1724.000
i24		93.000

i25	1008.000	
i26	2921.000	
i27	593.000	
i28	1133.000	
i29	69.000	
i30	50.000	
i31	256.000	
i32	1044.000	
i33	1579.000	
i34	2777.000	
i35	623.000	
i36	84.000	
i37	117.000	
i38	531.000	
i39	1406.000	
i40	16812.000	4592.000
i41	10103.000	2649.000
i42	897.000	797.000
i43	229.000	
i44	682.000	
i45	1116.000	
i46	487.000	1447.000
i47	23417.000	5854.000
i48	20460.000	5278.000
i49	41209.000	10303.000
i50	16319.000	4880.000
i51	204.000	
i52	12.000	
i53	31.000	
i54	1465.000	
i55	682.000	
i56	77.000	
i57	162.000	
i58	1301.000	
i59	403.000	

EXECUTION TIME = 5.328 SECONDS 17 MB 41.3.0

Anexo E. Representación gráfica de los problemas resueltos

PROBLEMA PROPUESTO N°1



PROBLEMA PROPUESTO N°2

