

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. José Andrés Araya Obando, Ing Braulio Umaña Quirós, Ing. Manuel Alán Zúñiga, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

**GUSTAVO
ADOLFO
ROJAS MOYA
(FIRMA)**

Firmado digitalmente por
GUSTAVO ADOLFO
ROJAS MOYA
(FIRMA)
Fecha: 2022.06.23
19:45:59 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

**JOSE ANDRES
ARAYA OBANDO
(FIRMA)**

Digitally signed by JOSE
ANDRES ARAYA
OBANDO (FIRMA)
Date: 2022.06.29
07:45:51 -06'00'

Ing. José Andrés Araya Obando.
Profesor Guía

**BRAULIO
ENRIQUE
UMAÑA QUIROS
(FIRMA)**

Firmado digitalmente
por BRAULIO
ENRIQUE UMAÑA
QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2022.06.27
18:02:20 -06'00'

Ing. Braulio Umaña Quirós.
Profesor Lector

**MANUEL
ANTONIO
ALLAN ZUÑIGA
(FIRMA)**

Digitally signed by
MANUEL ANTONIO
ALLAN ZUÑIGA
(FIRMA)
Date: 2022.06.27
22:19:56 -06'00'

Ing. Manuel Alán Zúñiga.
Profesor Observador

Diseño del proceso constructivo de las obras temporales de desvío del río y canal de riego, ubicadas en el sitio de presa del embalse Río Piedras, mediante modelación 4D.

Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME).

Abstract

The Water Supply Project for the Middle Basin of the Tempisque River and Coastal Communities (PAACUME), aims to adapt to water scarcity due to climate change in Guanacaste, providing this resource for various productive activities. Within this project, a reservoir will be built to generate electrical energy, for which the dam site must be built, basically first of the diversion of the Piedras River and the irrigation channel that crosses it. In this project, the strategy for excavation and earthworks, the creation of the work plan for the works, and the quantification of the work requirements with the help of programming and a 4D model made in Navisworks will be extended. The material extracted from the ignimbrite pit, which optimized the material hauling strategy due to the availability of the material on site, will be suspended. Also, the machinery and personnel required, such as hydraulic excavators and their operators for excavation, will be reduced. A total duration of 294 business days for the diversion works of the Río Piedras and the irrigation channel was calculated, in addition, a total volume of material for all works of approximately 109,270 m³ in cut and 57,200 m³ in fill was calculated, and a guide was developed for the use of the 4D model. Finally, it was concluded that an adequate design of the construction process that allowed to solve the challenge of diverting both the Piedras River and the irrigation canal for the construction of the dam site will be eliminated.

Keywords: Construction process, deviation works, Piedras river reservoir, 4D modeling, PAACUME.

Resumen

El Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME), pretende adaptarse a la escasez de agua debida al cambio climático en Guanacaste, brindando este recurso para diversas actividades productivas. Dentro de ese proyecto se construirá un embalse para generar energía eléctrica, por lo que se debe construir el sitio de presa, que requerirá primeramente del desvío del Río Piedras y el canal de riego que lo atraviesa. En el presente proyecto se determinó la estrategia para la excavación y movimiento de tierras, la creación del plan de trabajo de las obras, y la cuantificación de los requerimientos de obra con ayuda de la programación y un modelo 4D realizado en Navisworks. Se determinó que, se utilizará el material extraído del tajo de ignimbritas, el cual optimizó la estrategia de acarreo de materiales debido a la disponibilidad del material en el sitio. También, se determinó la maquinaria y el personal requerido, como excavadoras hidráulicas y sus operarios para la excavación. Se calculó una duración total de las obras de desvío del Río Piedras y el canal de riego de 294 días hábiles, además se calculó un volumen total de material para todas las obras de aproximadamente 109270 m³ en corte y 57200 m³ en relleno, y se desarrolló una guía para el uso del modelo 4D. Finalmente, se concluyó que se determinó un adecuado diseño del proceso constructivo que permitió dar solución al reto de desviar tanto el Río Piedras como el canal de riego durante la construcción del sitio de presa.

Palabras clave: Proceso constructivo, obras de desvío, embalse río Piedras, modelación 4D, PAACUME.

Diseño del proceso constructivo de las obras temporales de desvío del río y canal de riego, ubicadas en el sitio de presa del embalse Río Piedras, mediante modelación 4D.

ANTONY ANDRÉS SALAZAR CHAVES

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2022

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

1. Prefacio.....	1
2. Resumen ejecutivo	2
3. Introducción	5
4. Descripción del caso de estudio.....	8
5. Metodología.....	17
5.1. Recopilación y análisis de la información	17
5.2. Determinación de la estrategia para la excavación y movimiento de tierras.....	18
5.2.1. Determinación de la excavabilidad del terreno y su estrategia	18
5.2.2. Diseño de sitio	19
5.3. Generación del plan de trabajo de las obras	19
5.3.1. Definición de las actividades y el orden de las actividades.....	19
5.3.2. Logística de acarreo de materiales.....	21
5.3.3. Conformación de cuadrillas de trabajo	21
5.3.4. Requerimientos de equipo y maquinaria	23
5.3.5. Identificación de riesgos y limitaciones en las obras.....	23
5.4. Estimación de los requerimientos de obra.....	24
5.4.1. Determinación de las cantidades de los trabajos	24
5.4.2. Duración de los trabajos	31
5.4.3. Generación de la guía para el uso del modelo 4D	34
6. Resultados y discusión.....	35
6.1. Estrategia para la excavación y movimiento de tierras	35
6.1.1. Excavabilidad del terreno y su estrategia	35
6.1.2. Diseño de sitio	38
6.2. Plan de trabajo de las obras	40
6.2.1. Actividades y orden de actividades para la ejecución de las obras	40
6.2.2. Logística de acarreo de materiales.....	45
6.2.3. Cuadrillas de trabajo	48
6.2.4. Requerimientos de equipo y maquinaria	51
6.2.5. Riesgos y limitaciones	52
6.3. Cuantificación de los requerimientos de obra.....	53
6.3.1. Cantidades de los trabajos	53
6.3.2. Duración de los trabajos	59
6.3.3. Guía para el uso del modelo 4D	64
7. Conclusiones	65
8. Recomendaciones.....	68
9. Apéndices	69
10. Anexos.....	70
11. Referencias	71

1. Prefacio

El trabajo que se desarrolló durante esta práctica profesional dirigida permitió contribuir con el Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME), en el diseño del proceso constructivo de las obras de desvío del Río Piedras y el canal de riego. Diseñar el proceso constructivo es de gran importancia debido a que, se basa en optimizar los recursos que se utilizan, así como los tiempos de trabajo, para poder disminuir los costos de construcción. Si no se planifica y se organiza una obra de forma adecuada, no es posible establecer cómo se realizarán los trabajos, ni cómo se asignarán los recursos o requerimientos de la obra. Asimismo, si se desconoce la programación de una obra y por ende su ruta crítica, no se puede conocer en qué actividades se deben dar esfuerzos importantes para evitar atrasos. Si un proyecto de gran complejidad, como el que se abarca en el presente, se inicia sin contar con un plan de trabajo adecuado, es muy probable que se den retrocesos, atrasos, sobrecostos, y una gran desorganización en el manejo de los materiales y la mano de obra necesaria. Además, si se desconoce la fuente de materiales, los sitios de entrada o lugares de almacenamiento de dichos materiales, se podría caer en una cadena de malas decisiones durante la ejecución de las obras, provocando así, que se acudan a fuentes de material que puedan representar importantes incrementos en los costos. También, es de gran importancia conocer los requerimientos de maquinaria y equipo de un proyecto, ya que, si esto se desconoce, se podría acudir precipitadamente a maquinaria que no cumple adecuadamente con los objetivos que se desean, y por ende, se disminuirían los rendimientos de trabajo.

En el diseño del proceso constructivo de problemas complejos de ingeniería, como lo son las obras de desvío del Río Piedras y el canal de riego, tratadas en este proyecto, pueden existir diversas formas de llevarse a cabo, por lo que, buscar la manera más eficaz, eficiente y de la mano con la sostenibilidad ambiental siempre fue la meta. El desvío del flujo de agua de ambos cauces (Río Piedras y canal de riego) significó un gran reto ya que, en todo momento deberá fluir el agua, debido a que los usuarios de riego no pueden verse afectados por cortes muy prolongados, así como también, la supervivencia de la fauna y el control ambiental en el cauce del río. Por otra parte, el sitio de presa debe quedar completamente seco para el momento de iniciar con la construcción de la presa principal. Asimismo, el desvío depende de otras estructuras, tal como la alcantarilla de descarga de fondo y el túnel de conducción, las cuales deben estar finalizadas para poder realizarlo. Por lo anterior es que utilizar métodos tradicionales de diseño de procesos constructivos resulta un trabajo aún más laborioso y complejo, es por esto por lo que se propuso utilizar herramientas como un modelo 4D, que integre toda la información necesaria para llegar al resultado óptimo del diseño del proceso constructivo. De esta manera y considerando lo definido anteriormente, el objetivo principal formulado para el desarrollo de este trabajo final de graduación, con el fin de optar por el grado de licenciatura en Ingeniería en Construcción fue, diseñar el proceso constructivo de las obras de desvío del Río Piedras y del canal de riego, ubicadas en el sitio de presa del embalse Río Piedras

Se extiende el agradecimiento a la Coordinación Técnica del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (Senara), y en especial, a los Ingenieros Osvaldo Quirós y María Fernanda Araya, por la oportunidad, ayuda y apoyo brindado durante la ejecución de esta práctica profesional dirigida. Se agradece también al Ingeniero en Construcción Jonathan Cortés Mena y al técnico Olman Salazar por el apoyo y ayuda brindada durante la ejecución de este trabajo. A los profesores de la carrera de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Principalmente, al profesor Ing. Andrés Araya Obando y la Ing. Ivannia Solano, por ser guía y apoyo durante el desarrollo de este proyecto y a lo largo de la carrera. A mis papás, mi novia y demás familiares por su sacrificio y apoyo. Finalmente, y no menos importante, a Dios por ser mi apoyo en todo momento.

2. Resumen ejecutivo

El Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME), es un proyecto que busca intervenir la escasez de agua para actividades agroalimentarias, riego de zonas turísticas, consumo humano y generación eléctrica en la provincia de Guanacaste, mediante el aprovechamiento de las aguas provenientes del embalse Arenal. Dentro de las obras de infraestructura que se pretenden construir para lograr esto, está un embalse, ubicado en Bagaces, necesario la generación de energía eléctrica. Este embalse se logrará mediante la construcción del sitio de presa, en donde se construirá una presa tipo enrocado con cara de concreto. Durante la construcción del sitio de presa se deberá realizar el desvío del Río Piedras y dar continuidad al canal de riego existente que brinda el servicio de riego en el margen izquierdo del Río Tempisque. Para esto, se construirán alcantarillas que estarán por debajo de la presa y que funcionarán como la descarga de fondo del embalse, por donde se desviará el río en su margen derecho mediante un canal trapezoidal excavado y sin revestir, así como también, se construirán una preatagüa, atagüa, contraatagüa y un dique que servirán para desviar el cauce del río. Asimismo, para dar continuidad al canal de riego, este se desviará mediante un canal temporal hacia la toma de aguas, ubicada aproximadamente a 300 metros del sifón de salida del canal de riego que atraviesa el Río Piedras.

Este trabajo final de graduación permitió dar solución al problema que se tenía, el cual se basaba en el desconocimiento de la logística, estrategia y organización de cómo se construirán estas obras de desvío ubicadas en el embalse Río Piedras. Por tal motivo, este proyecto consistió en el diseño del proceso constructivo de estas obras.

Para lograr los objetivos propuestos se determinó una estrategia para la excavación y movimiento de tierras, la cual se dividió en la determinación de la excavabilidad del terreno y su estrategia para lograrlo. Como una segunda fase, se desarrolló el plan de trabajo de las obras de desvío, abarcando temas como la definición de las actividades a ejecutar y su respectivo orden de trabajo, la logística de acarreo de los materiales, la conformación de las cuadrillas de trabajo, los requerimientos de equipo y maquinaria, y los riesgos y limitaciones que podrían presentarse en estas obras. Finalmente, la última fase de trabajo consistió en la cuantificación de los requerimientos de obra, como las cantidades de material y las duraciones de las actividades que se definieron en la programación.

La excavabilidad del terreno se determinó a partir de un análisis de la velocidad de onda sísmica que permitió conocer la facilidad de excavación, así como el tipo de maquinaria necesaria para realizarla. Luego, se estableció el material a utilizar en los rellenos de las obras a construir, mediante un análisis de las propiedades y el aprovechamiento del material disponible en los tajos del proyecto. Además, el diseño de sitio se realizó gracias a la ubicación predeterminada de las obras en el informe de ingeniería (ICE, 2018). Además, se propuso una nueva escombrera para establecer un eficiente uso de los espacios disponibles. El análisis de la información anterior permitió proponer mediante 3 etapas, la estrategia para la excavación y movimiento de tierras. El plan de trabajo se logró mediante la definición de las actividades y su orden, determinando así la ruta crítica, esto gracias a que se implementó una estructura de desglose de trabajo (EDT) y se acataron las recomendaciones realizadas por diferentes expertos en el tema, considerando además, las especificaciones técnicas de las obras. Además, se determinó la logística de acarreo de materiales gracias al análisis de las rutas más cortas hacia las escombreras definidas en el diseño de sitio. El tipo de maquinaria que se definió mediante la excavabilidad y lo definido en el informe de ingeniería (ICE, 2018), permitió determinar los requerimientos de las cuadrillas de trabajo, las cuales, están conformadas, principalmente, por los operarios de la maquinaria pesada a utilizar. Asimismo, se tomaron como referencia, rendimientos de maquinaria y mano de obra presentada en proyectos ya realizados en el país, y se ajustaron considerando también los tiempos no productivos. Las recomendaciones realizadas por

expertos y el análisis de otros proyectos de este tipo permitieron identificar los riesgos y las limitaciones. Para la determinación de los requerimientos de obra fue necesario construir un modelo 4D en Navisworks mediante la integración de la programación de las obras que se realizó en MS Project y el modelo 3D realizado en Civil 3D. Con este modelo se calcularon las cuantificaciones de materiales, lo cual, funcionó para determinar las duraciones de las actividades mediante el producto de esas cantidades de material con los rendimientos establecidos.

Para determinar todo esto, fue necesario contar con fuentes de información confiables como el Informe de ingeniería o informe técnico de diseño (ICE, 2018), el estudio de factibilidad del proyecto (Senara, 2018), tesis relacionadas a la planificación de este tipo de obras y consultas realizadas a expertos en el diseño, y construcción de obras de infraestructura hidráulica. A partir de esto, se obtuvo gran cantidad de información que se analizó mediante una exhaustiva revisión.

Se obtuvo la estrategia para la excavación y movimiento de tierras, en donde se definió una etapa preliminar, una etapa fundamental y una etapa final. Además, estas etapas abarcaron las principales actividades a realizar en la excavación y movimiento de tierras, tales como replanteo topográfico, eliminación de la capa vegetal, excavaciones, acarreo y compactado de materiales, y perfilado de taludes. Se determinó que, se deberá realizar la excavación de las obras con excavadoras hidráulicas, acarrear el material con vagonetas articuladas, esparcir y acomodar mediante un tractor de oruga y compactar con rodillo compactador en todas las obras de desvío. Debido a que el acarreo del material deberá hacerse con vagonetas, se realizó un análisis de las rutas más cortas mediante el diseño de sitio y la red de caminos establecida en este. El material para utilizar en todos los rellenos será extraído del tajo de ignimbritas, debido a la disponibilidad de este, sus propiedades mecánicas y excavabilidad. Asimismo, las rutas cortas se establecieron desde las obras a excavar hasta las escombreras disponibles, definiendo así los rendimientos más altos para el acarreo. Para la construcción del canal auxiliar y la excavación del canal de riego temporal, y la ataguía principal, se excavará el material y se acarreará hasta la escombrera más cercana. Para la construcción de los rellenos de la preataguía, la contraataguía, el dique de cierre, la ataguía y el canal temporal de riego se propuso llevar el material desde el tajo, vaciarlo, acomodarlo y compactarlo hasta llegar a su altura y propiedades geométricas determinadas. Además, se determinaron las actividades a realizar; primeramente, se iniciará con la excavación del canal auxiliar hasta topar con las alcantarillas de descarga de fondo, sin topar con el río, debido a que aún no se podrá desviar. Luego, paralelamente, se construirán la descarga de fondo y la toma de aguas, y el túnel de conducción. De igual manera, paralelo a esas obras, se construirán las partes más altas de la ataguía, para, después de esto, construir el canal temporal. Luego de finalizar lo anterior, se finalizará el canal auxiliar y se conectará con el río. Seguidamente, se construirá el dique de cierre, para después construir la preataguía y la contraataguía paralelamente. Finalmente, se terminarán los rellenos de la ataguía una vez estén desviados, tanto el río como el canal de riego.

En el plan de trabajo se determinó que, la conformación de las cuadrillas será de los operarios de la maquinaria pesada, la cual se basará en excavadoras hidráulicas PC 300, vagonetas articuladas CAT 740, tractor de oruga (D6), compactador de rodillo (CAT CS-5, 10 TON), back hoe, y sapo brincón. Además, dependiendo de la obra, variará la conformación de 1 a 6 operarios. Asimismo, se determinó una cuadrilla típica de apoyo a las obras, en la cual, se incluyó el coordinador de obra civil, el encargado de maquinaria pesada, peones, inspector de costos y auxiliar de maquinaria.

Además de las cantidades para cada obra, se determinó que, el balance del material de corte contra el de relleno será de 52065 m³. Esto quiere decir que, se excavará mucha más cantidad de material que el que será utilizado para los rellenos. Asimismo, la duración total de las obras de desvío programada fue de 294 días hábiles, teniendo como fecha de inicio el mes de enero del año 2025 y finalizando en enero del año 2026. Esto incluyó la duración de la construcción de la descarga de fondo y el túnel de conducción, lo cual no formó parte como tal del desvío. Se determinó que, para la excavación del canal auxiliar se tendrá una duración total de 38 días, para la construcción de la ataguía se tendrá una duración total de 68 días, y la duración del dique de cierre, la preataguía, la contraataguía y el canal temporal será de 2 días, 6 días, 9

días y 22 días hábiles respectivamente. Se vio que la ruta crítica estará en las obras de desvío del río específicamente luego de comenzar la construcción de la contraataguía debido a las características de las precedencias de estas obras, por lo que se deberá realizar un adecuado uso de la estrategia de materiales propuesta para evitar atrasos en los procesos debido a la disponibilidad del material al momento de requerirse.

Mediante el análisis realizado, se determinó un adecuado diseño del proceso constructivo que permitió dar solución al reto de desviar, tanto el Río Piedras como el canal de riego durante la construcción del sitio de presa, debido a que se realizó un plan de trabajo que contempló la programación de los requerimientos de obra mediante un modelo 4D, y una adecuada propuesta del orden de las actividades. Estos se basaron en una detallada definición y análisis de los materiales disponibles, la mano de obra y la maquinaria. Sin embargo, la información de fechas de inicio y fin es variable y sensible, por lo que, se deben orientar esfuerzos en la integración de la programación de la totalidad de las obras del proyecto PAACUME para determinar con mayor certeza estas fechas. Asimismo, se determinó que, el uso de la ignimbrita disponible se vuelve un elemento clave para el aprovechamiento de los materiales, haciendo eficiente y óptimo el proceso constructivo, aunado a que se determinó un adecuado método de excavación y movimiento de tierras mediante la separación del proceso en 3 etapas. El plan de trabajo, además, permitió establecer el adecuado orden de las actividades y la logística de acarreo de materiales, mano de obra y equipos dando solución al problema ya mencionado.

3. Introducción

El diseño del proceso constructivo de una obra consiste en definir un plan de trabajo que contemple la integración de los requerimientos de obra con la planificación, organización, programación y control de la misma, para ejecutar adecuadamente los procesos de la construcción. La planificación de la construcción es el primer paso para integrar todas las actividades del proyecto dentro de un plazo y presupuesto determinados, estableciendo así la maquinaria, la mano de obra y los materiales necesarios (Gerardi, 2022). Existen diferentes técnicas de planificación de la construcción, sin embargo, una de las mejores técnicas de planificación es el método de la ruta crítica (CPM). Este permite calcular el tiempo mínimo para ejecutar la actividad, computando las fechas de inicio y finalización. Además, crea una base para el seguimiento durante el control de la obra. Asimismo, según Escuela Postgrado de Ingeniería y Arquitectura (2022), CPM es una metodología muy utilizada en la programación de proyectos, y uno de los métodos de planificación más útiles.

Por otra parte, Jiménez (2022) menciona que, la organización de las obras es el conjunto de métodos y técnicas que se utilizan para elevar el rendimiento de la mano de obra, determinar su remuneración y considerar los factores que influyen en su rendimiento. Para determinar la organización de las obras es necesario responder a las preguntas ¿qué, cómo, con qué, quién, y cuándo? se realizarán las obras. La programación de obras permite establecer cómo se realizará la obra y asignar los recursos necesarios para cada trabajo, determinando las duraciones, fechas de inicio y fin, tiempo total de la obra y las tareas más importantes o críticas (Wilde & Forenza, s.f.). La programación integra la planificación y la organización de las obras. Realizar esto con métodos tradicionales podría ser muy ineficiente y antiguo, ya que, estos aplican técnicas manuales de cálculo y dibujos a mano de los planos. Por lo tanto, actualmente existen herramientas de programación y dibujo asistido por computadora que mejoran esos procesos, tales como: Civil 3D, Microsoft Project y Navisworks. Sin embargo, es importante destacar que se requiere de un muy buen manejo de las herramientas y capacidad computacional para su correcto uso.

Seguidamente, el control de obra es el seguimiento de actividades realizado con el fin de asegurarse que lo planeado se haga correctamente dentro del tiempo programado (Arellano, 2015). Para realizar un adecuado control de obra se debe actualizar constantemente lo planeado en la programación, utilizando las herramientas y metodologías expuestas, para de esta manera, poder hacer una evaluación de lo realizado y compararlo con lo planeado, y tomar decisiones correctivas o de mejora. Es por este motivo que se debe realizar un proceso constructivo bien definido antes de la construcción de una obra.

El diseño del proceso constructivo se da en las primeras etapas de un proyecto de construcción, por lo que, este se debe realizar de la mejor forma posible para evitar aumentos de esfuerzos, costos, o efectos adversos en la etapa de ejecución y puesta en operación. El autor MacLeamy P. (2004) presenta un gráfico (Figura 1) que demuestra, de acuerdo con la línea 4 "Proceso de diseño preferido", que la toma de decisiones y la realización de esfuerzos a temprana edad del proyecto generan un gran beneficio a lo largo del ciclo de vida del mismo, disminuyendo los esfuerzos que se dan en las etapas posteriores.

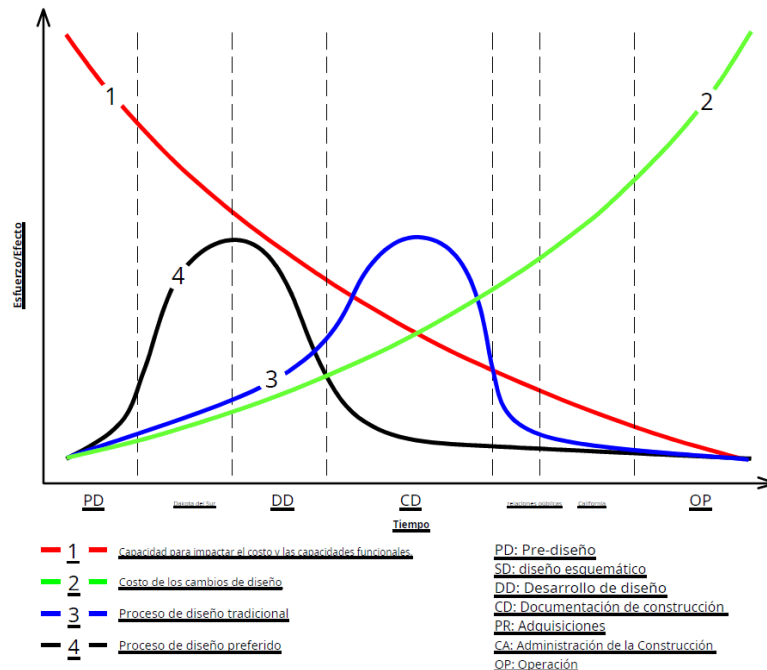


Figura 1. Curva de esfuerzo del proceso constructivo.
Fuente. MacLeamy P. (2004).

El proyecto PAACUME busca brindar una oportunidad de desarrollo a diferentes actividades productivas de la provincia de Guanacaste, adaptándose al cambio climático y la escasez de agua en la zona, mediante el aprovechamiento de las aguas del sistema hidroeléctrico Arenal, Sandillal. El proyecto comprende diversas grandes obras de infraestructura que permitirán un mejor aprovechamiento de este recurso y un aumento en el desarrollo socioeconómico de la región (Senara, 2018). Dentro de estas importantes obras se encuentra el embalse Río Piedras. Para la construcción de este embalse se construirá el sitio de presa, por lo que, primeramente, se deberá desviar el Río Piedras y el canal de riego que atraviesa la zona y que cruza el río mediante un sifón, esto con el fin de secar el sitio de presa y lograr la construcción de la misma. El desvío del Río Piedras se realizará a través de un canal auxiliar que pasará por unas alcantarillas que funcionarán como descarga de fondo debajo de la presa, y que retornarán nuevamente al río aguas abajo. Además, se deberá garantizar siempre el flujo del agua durante el desvío del Río Piedras, lo cual significa un gran reto en el proyecto, debido a que, se debe respetar el caudal ecológico (caudal mínimo para la supervivencia de la fauna del río) durante la ejecución del desvío del río. Por otra parte, el desvío del canal de riego se realizará por medio de un canal temporal que dirigirá el canal existente hasta la toma de aguas y que atravesará el túnel de conducción hasta la casa de máquinas, para posteriormente, restituir el agua nuevamente al canal de riego aguas abajo. Este desvío también implica un gran reto debido a que, se debe dar continuidad al flujo de agua para brindar un servicio normal de riego, ya que no se puede interrumpir el riego de la zona por grandes periodos de tiempo.

En Costa Rica, se han desarrollado diversos proyectos de infraestructura hidráulica, dentro de los cuales se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, que se comenzó a planificar en la década de los noventa. En ese proyecto se realizaron diversos estudios de planificación y productividad, sin embargo, en el desarrollo de estos no fueron definidas todas las herramientas y metodologías que se deben implementar para un adecuado diseño del proceso constructivo. El uso de esas herramientas requiere de un gran esfuerzo para ser adaptadas en proyectos de infraestructura hidráulica, debido a la complejidad de este tipo de estructuras. Por lo que, la mayoría de los avances tecnológicos en materia de planificación y datos de obra civil, como rendimientos de obra, se han enfocado principalmente a edificaciones e infraestructura, como carreteras.

Recientemente, se realizó un proyecto de planificación para el sitio de presa y casa de máquinas en el proyecto PAACUME (Artola & Roldán, 2021), en donde se implementaron ese tipo de herramientas de programación y modelación, como Revit y Navisworks, lo que permitió determinar una adecuada programación de las actividades a realizar. A pesar de esto, en ese proyecto no se analizó a profundidad temas de maquinaria, mano de obra o rendimientos, lo que provocó que la programación estuviera sujeta a posibles variaciones respecto a esto. De allí radica la importancia de definir correctamente tales criterios al planificar una obra de este tipo y utilizando los programas computacionales mencionados. El modelado 4D permite aplicar estas herramientas para ver el progreso temporal de las actividades desde la fase de diseño, con el fin de obtener importantes ventajas como la optimización del tiempo, detección de errores a priori y planificación, sin entrar en presupuestación (BIMnD Building new dimensions, 2022).

Para el desarrollo de este proyecto, se definió como objetivo principal: Diseñar el proceso constructivo de las obras de desvío del Río Piedras y del canal de riego, ubicadas en el sitio de presa del embalse Río Piedras. Contribuyendo así con la administración técnica de PAACUME, en la adecuada planificación del diseño del proceso constructivo de las obras de desvío del Río Piedras y del canal riego, lo que contribuirá con la ejecución correcta y eficaz de estas obras, y la planificación de futuras obras de este tipo. Para lograrlo, se formularon los objetivos específicos que se describen a continuación:

- Diseñar una estrategia para la excavación y movimiento de tierras de las obras de desvío, la construcción de las presas y canales de desvío, de acuerdo con los requerimientos técnicos, diseño de sitio y las características geológicas del terreno.
- Elaborar un plan de trabajo que contemple el diseño de sitio, gestión de espacios, logística de acopio de materiales, orden de las actividades, conformación de cuadrillas de trabajo y los requerimientos de maquinaria y equipo de las obras.
- Crear y detallar un modelo 4D de las obras para determinar las cantidades de obra e integrar la programación de las actividades.

4. Descripción del caso de estudio

PAACUME es un proyecto creado por el gobierno de la República, administrado por Senara, el cual busca crear una adaptación al cambio climático en Guanacaste, ya que este genera la escasez de agua para la seguridad agroalimentaria y consumo humano.

“Actualmente, las aguas provenientes del embalse Arenal son utilizadas en tres ocasiones por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para generación de energía eléctrica. Una vez que el agua pasa el embalse de Sandillal, se entrega al Senara, en la presa Miguel Pablo Dengo, y mediante los canales Sur y Oeste, es aprovechada para el riego agropecuario en los cantones de Liberia, Cañas y Bagaces. El canal oeste llega hasta Bagaces y atraviesa el Río Piedras. Es justo aquí donde inicia PAACUME, primero con obras de infraestructura y luego con un plan de desarrollo” Senara. (15 de abril de 2022).

Las principales obras de infraestructura que comprende PAACUME son: una presa que crea un embalse con un espejo de agua de 850 hectáreas, infraestructura para generación hidroeléctrica en la presa, un canal de 55 kilómetros para trasladar el agua desde el embalse hasta Palmira, donde se atravesaría al Río Tempisque mediante un sifón, y por último, la red de conducción y distribución a más de 1000 propietarios de unas 17 mil hectáreas, en los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya.

El proyecto Embalse Río Piedras, consiste en el represamiento de las aguas de este río y del Canal Oeste. Para la construcción de este embalse es necesario construir el sitio de presa. La presa es de tipo enrocado con cara de concreto. Además, se construirá un vertedor de excedencias tipo canal rectangular de 27 metros de ancho y 390 metros de longitud, y que concluye en una estructura disipadora que incorpora nuevamente el agua al río. La descarga de fondo será realizada mediante la construcción de unas alcantarillas que cruzarán por debajo de la presa, y servirán también como medio para el desvío del río durante la construcción de la presa. Asimismo, se construirá un túnel de conducción de aproximadamente 250 metros de longitud para llevar el agua de la toma de aguas hasta la casa de máquinas. La toma de aguas principal se construirá a la entrada del túnel, y cuenta con una compuerta de control.

En la Figura 2, se puede apreciar espacialmente el cauce que tiene actualmente el Río Piedras y el canal de riego. Se puede ver también cómo se ubican las obras mencionadas anteriormente, respecto al Río Piedras y el canal de riego; y, asimismo, en la Figura 3, se puede ver con mayor detalle cuál es cada estructura.

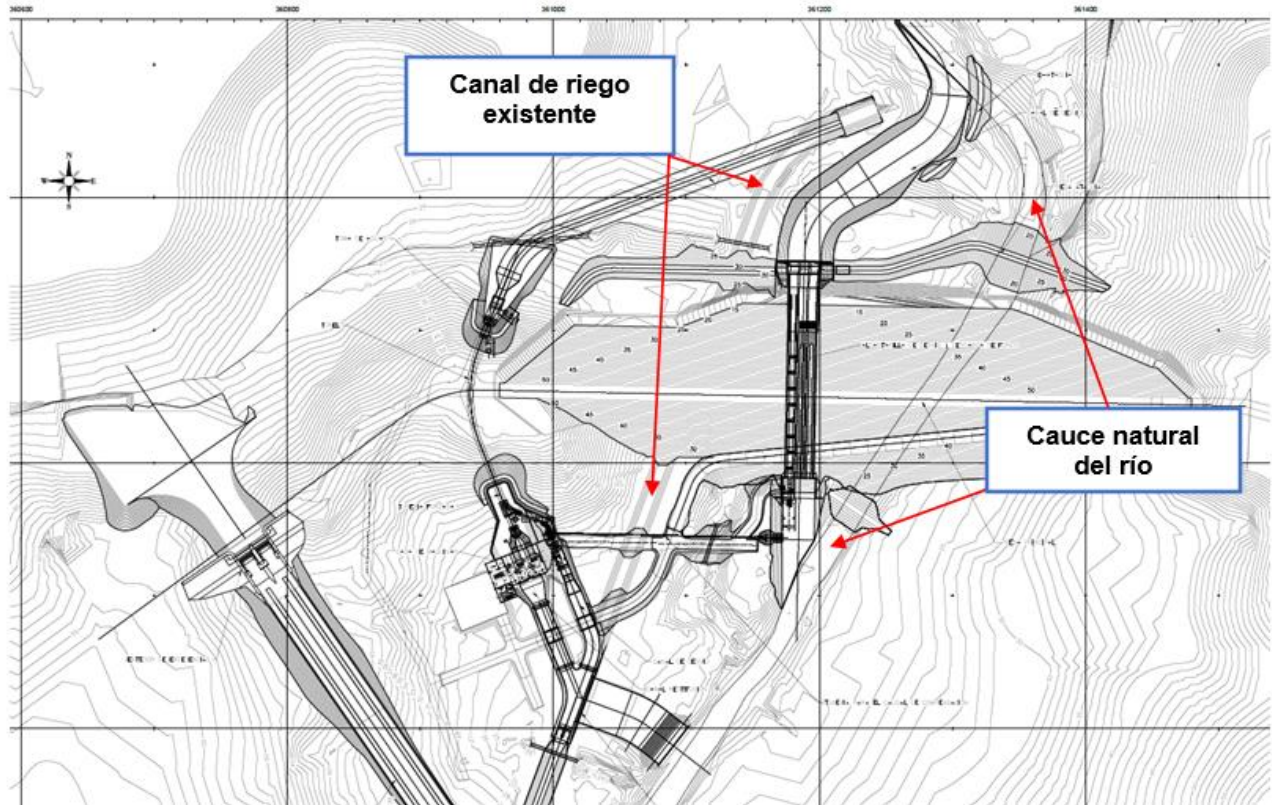


Figura 2. Ubicación espacial del cauce natural de Río Piedras y el canal de riego existente.

Fuente. Adaptado del Plano 6.2.005.

En este trabajo final de graduación se trabajó únicamente en el diseño del proceso constructivo de las obras de desvío de este proyecto. Estas obras servirán para desviar el agua y poder construir el sitio de presa. Durante la construcción de estas obras de sitio de presa se debe desviar el río, así como darle continuidad al canal de riego. Es decir, el Río Piedras debe ser desviado por las alcantarillas de descarga de fondo para así secar el sitio de presa y poder realizar el relleno de la presa. Asimismo, durante la construcción de estas obras se debe dar continuidad al canal de riego existente debido a que no se puede cortar el servicio de abastecimiento de agua que hay actualmente. Por lo tanto, para poder desviar este canal sin cortar el flujo del agua, se realizará la desviación hacia la toma principal y se conducirá por el túnel de conducción, hasta la casa de máquinas y retornando nuevamente al canal existente aguas abajo.

En la siguiente imagen (Figura 3) se puede observar la planta general de las obras del sitio de presa, donde se muestran las principales obras, y se observa cómo el canal de riego será desviado por la toma de aguas que lleva a la casa de máquinas, así como el desvío del río mediante unas alcantarillas que funcionarán posteriormente como la descarga de fondo del embalse Río Piedras.

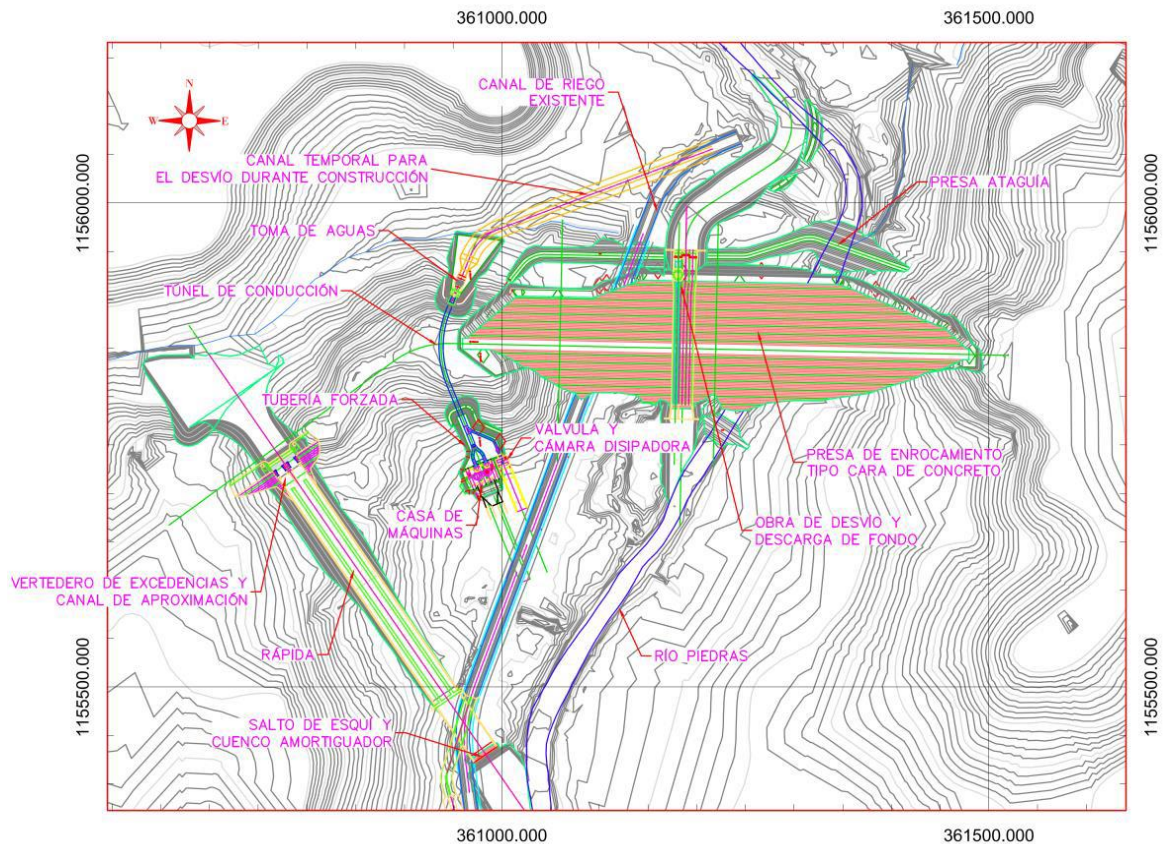


Figura 3. Planta general de las obras del sitio de presa.
Fuente. ICE, 2018.

Como parte de la definición de las obras que se trataron en este proyecto, las cuales corresponden únicamente al desvío del Río Piedras y del canal de riego en su tramo Oeste, se muestra a continuación los detalles técnicos de cada uno de los elementos necesarios para realizar estos desvíos, que se definieron en el diseño de las obras mediante el informe de diseño (ICE, 2018).

El canal auxiliar, es el canal por el cual se guiará el Río Piedras hacia las alcantarillas que funcionarán como la descarga de fondo, el cual posee las siguientes características:

- Longitud de aproximadamente 200 metros.
- Sección trapezoidal de 30 metros de ancho.
- Taludes de 1H:1V.
- Pendiente de -0,91%.
- Conecta el cauce del río con una batería de 3 alcantarillas rectangulares de 6.0 x 6.5 metros.
- Se restituye las aguas al río mediante otro canal de aproximadamente 60 metros de largo, luego de la cámara disipadora a la salida de las alcantarillas, con pendiente de 0,00%.
- Canal excavado y sin revestir.

La preataguía permitirá que las aguas del río sean desviadas por el canal auxiliar descrito anteriormente, la cual tendrá las siguientes características:

- Longitud de aproximadamente 60 metros (obstruye el paso natural del río).

- Tiene un ancho de berma de 4 metros.
- Taludes de 1.5H:1V
- Elevación de cresta de 22 m.s.n.m.

El dique de cierre, el cual se encuentra al margen izquierdo del canal auxiliar, es un dique que permitirá cerrar un pequeño valle y evitará que el agua del río se desborde por allí. Asimismo, este posee las siguientes características, las cuales son similares a las de la preatagüa:

- Longitud de 25 metros aproximadamente.
- Tiene un ancho de berma de 4 metros.
- Taludes de 1.5H:1V.
- Elevación de cresta de 22 m.s.n.m.

A continuación, en la Figura 4 se puede observar un extracto de los planos de las obras, en donde se aprecia el canal auxiliar que dirigirá el río hacia la descarga de fondo, la preatagüa y el dique de cierre.

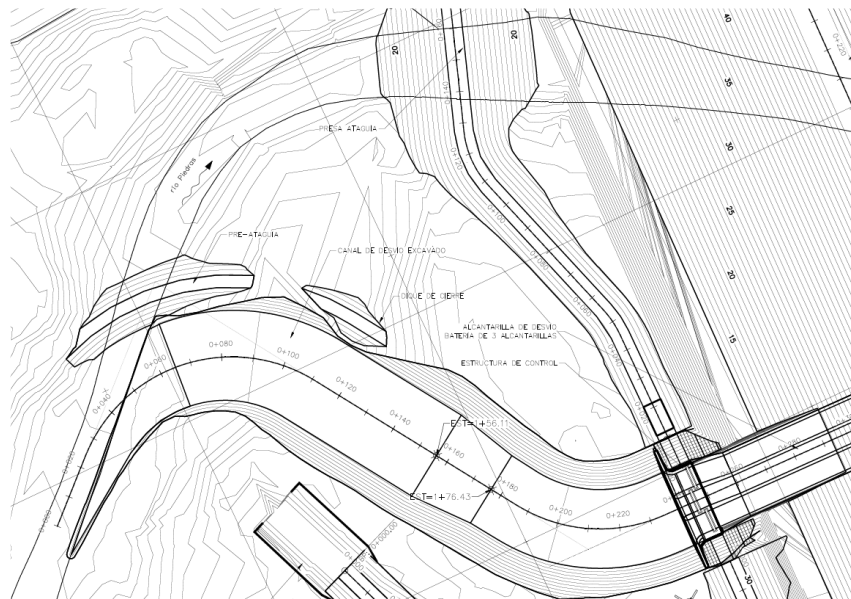


Figura 4. Detalle de las obras de entrada para el desvío del Río Piedras.
Fuente. SENARA, 2020.

La contraatagüa, es la estructura que permite el cierre del río aguas abajo, para evitar que el agua se devuelva por el cauce natural del río debido a su baja pendiente. A continuación, en la Figura 5, se pueden observar sus características geométricas mediante una vista en planta, en donde también se puede apreciar el tramo de salida del canal auxiliar:

- Tiene la misma composición que la preatagüa y el dique de cierre.
- Taludes de 2.0H:1V.
- Elevación de cresta de 22 m.s.n.m.
- Tiene un ancho de berma de 4 metros.

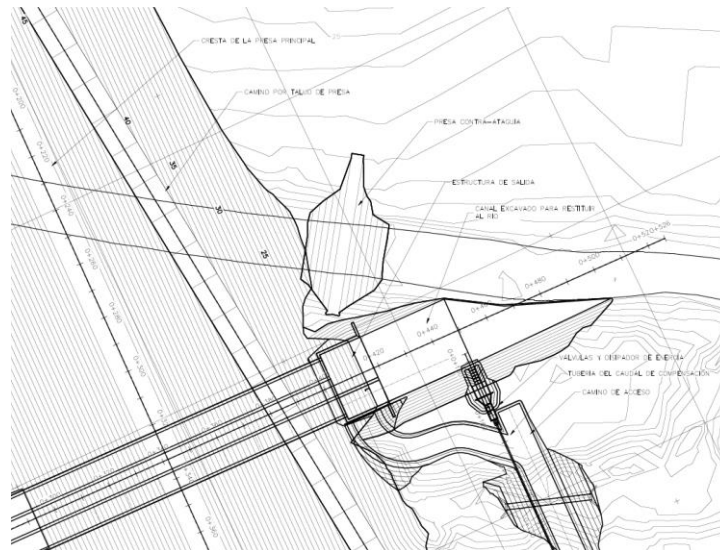


Figura 5. Detalle de las obras de salida para el desvío del Río Piedras.
Fuente. SENARA, 2020.

La ataguía principal, es una de las obras más importantes en el desvío del Río Piedras y el canal de riego, debido a que es la estructura que permitirá el desvío total y definitivo de las aguas, y protegerá la excavación del sitio de presa ante cualquier posible aumento en el caudal.

- Tiene aproximadamente 430 metros de longitud.
- Tiene un ancho de berma de 6 metros.
- Tiene su cresta en el nivel 30 m.s.n.m.
- Su relleno principal es de arena no seleccionada.
- Tiene una geomembrana de HDPE mm en su cara aguas arriba.
- Posee una protección de arena fina para la geomembrana de HDPE.
- Posee una trinchera de arena fina de 60 x 60 centímetros para el amarre de la geomembrana en la parte superior de la ataguía.
- Posee un RIP RAP de protección aguas arriba.
- Tiene un relleno de aluvión en la base de la ataguía, aguas arriba para proteger la socavación del material.
- Posee además una excavación para su debida cimentación.

En la Figura 6 se muestra la parte derecha de la ataguía, y en la Figura 7 se muestra la parte izquierda de la misma. Asimismo, en la Figura 8 se puede observar un corte transversal de la composición de la ataguía.



Figura 6. Detalle de la ataguía en su parte derecha.
Fuente. Extraído del plano 6.1.210 (ICE, 2018).

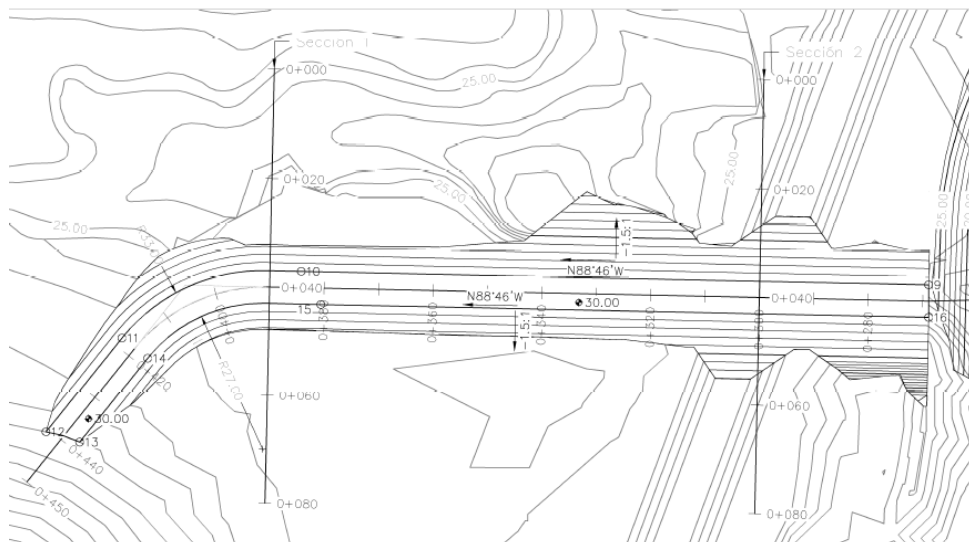


Figura 7. Detalle de la ataguía en su parte izquierda.
Fuente. Extraído del plano 6.1.210 (ICE, 2018).

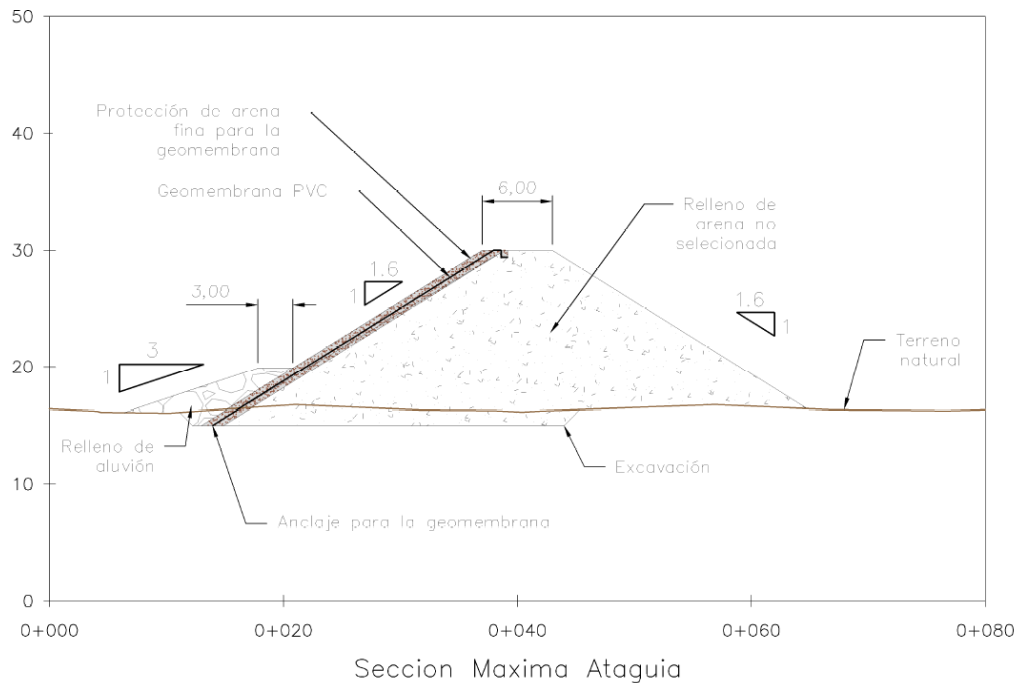


Figura 8. Detalle de la secci6n transversal de la ataguía.
Fuente. Extraído del plano 6.1.210 (ICE, 2018).

El canal temporal de riego, el cual funcionar4 para desviar el canal de riego existente mediante la toma de aguas, ser4 un canal construido con rellenos de material granular. A continuaci6n, se mencionan algunas de sus característic4s geométricas:

- Aproximadamente 300 metros de longitud.
- Secci6n trapezoidal de 6 metros de ancho.
- Taludes 1.5H:1V.
- Pendiente de 1:10000.
- Sin revestir.
- Pretende trasegar 72000 m³/h.

El nivel de agua del canal de riego existente debe ser elevado 1,80 metros para poder abastecer el caudal de demanda. Para esto, se deben construir muros de elevaci6n en el sif6n que atraviesa actualmente el Rí0 Piedras. Las obras de construcci6n de estos muros para elevar el nivel del agua por encima del nivel actual no se trabajaron, debido a que no se cuenta con planos ni diseño de dichas obras, adem4s de que, el diseño de estas no est4 incluido en el alcance de este proyecto. Por lo tanto, únicamente se trabaj6 con la parte de rellenos y cortes del canal temporal de riego, como se detalla m4s adelante. En la siguiente imagen se puede apreciar un detalle del canal temporal (Figura 9).

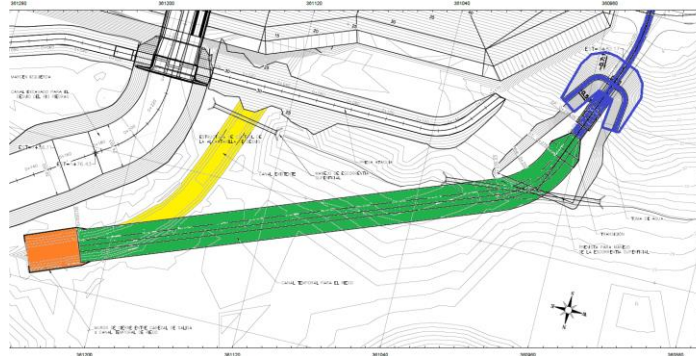


Figura 9. Detalle del canal temporal de riego.
Fuente. SENARA, 2020.

Como se pudo observar, se cuenta con toda la información técnica de las obras en estudio. Sin embargo, no se definió el material de los rellenos a construir. Por este motivo se realizó una propuesta de los materiales que se deberán utilizar, tomando en cuenta los materiales disponibles en el sitio o cercanos a las obras, y así poder tener un mayor aprovechamiento de los materiales. Según el informe de ingeniería (ICE, 2018), se definieron dos tajos cercanos a las obras, un tajo de ignimbritas y un tajo de lavas. El tajo de ignimbritas será la fuente principal a utilizar para los rellenos de los diques presentados en este apartado. Las ignimbritas son rocas con una estructura maciza granular constituida por clastos de cristales muy bien cementados. En el siguiente capítulo se define con mayor claridad los materiales a utilizar.

Las escombreras y caminos ya estaban definidos, diseñados y ubicados, por lo que, se consideró esa misma información en este proyecto. Esto se puede apreciar de mejor manera en los Anexos 1 y 2 (Planos 1.2.010 y 1.2.020). Por otra parte, se cuenta con 3 escombreras ubicadas según lo que se muestra en la Figura 10, con las capacidades de almacenaje que se muestran en el Cuadro 1. Además, se propuso una cuarta escombrera, la cual es temporal, para el almacenamiento de materiales aprovechables posterior a su excavación; y a esta también se le definió una capacidad máxima de almacenaje. Esta cuarta escombrera se define con mayor detalle en los siguientes capítulos.

Cuadro 1. Capacidad de almacenamiento de las escombreras.

Capacidad de escombreras	
Escombrera	Capacidad m ³
Escombrera 1	350000
Escombrera 2	307000
Escombrera 3	101000
Escombrera 4	52350

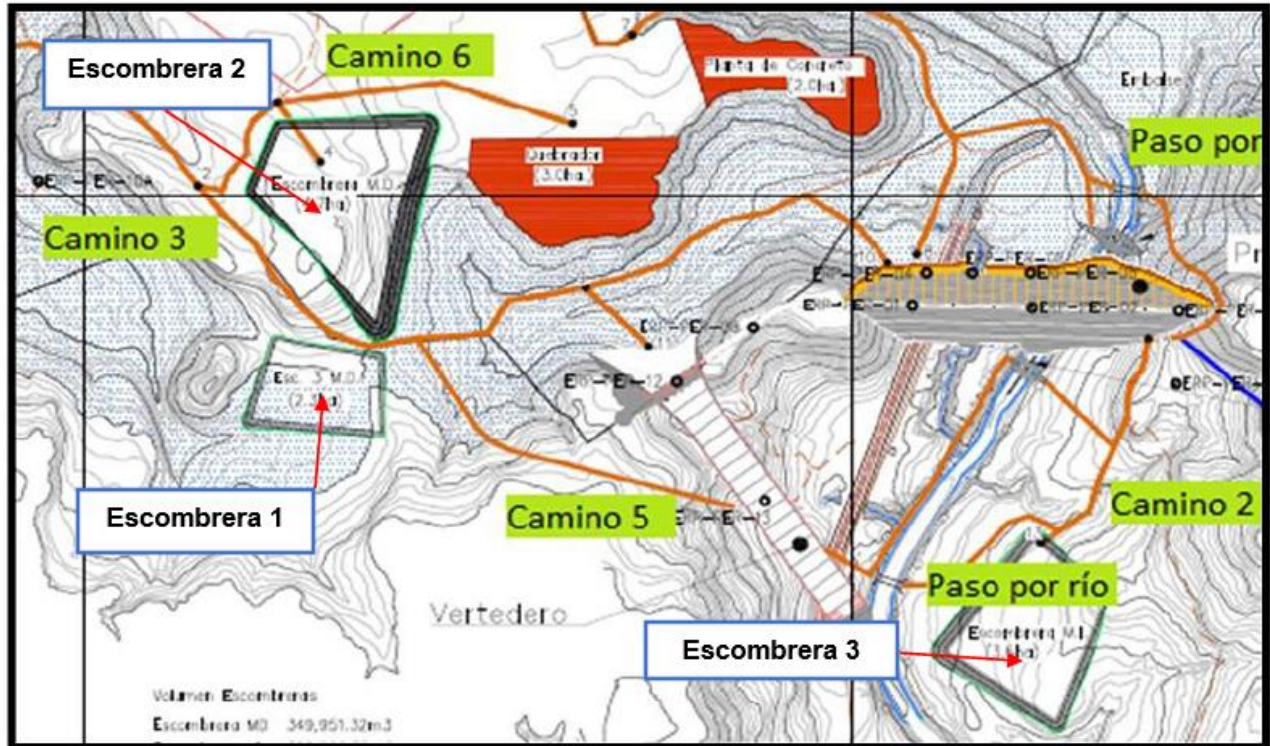


Figura 10. Ubicación de las escombreras definidas originalmente en el proyecto

Durante la construcción de las obras de desvío, se realizarán excavaciones y voladuras en las laderas y las partes más altas de la fundación de la presa principal, lo cual no forma parte del alcance de este proyecto. Sin embargo, el material que se extraerá de estas zonas son ignimbritas que presentan características muy similares al material del tajo. Por lo que, este material puede ser aprovechado en la construcción de las obras de desvío. Aunque, se deben realizar pruebas de calidad de los materiales extraídos para verificar su posible aprovechamiento.

Para realizar el desvío del Río Piedras a través del canal auxiliar es necesario que esté finalizada la construcción de las alcantarillas que pasan por debajo de la presa principal. Estas alcantarillas funcionarán como descarga de fondo del embalse. La duración total de esta obra (alcantarillas de desvío) es de 205 días hábiles, según lo estimado por Artola & Roldán (2021). Asimismo, para realizar el desvío del canal de riego es necesario que esté finalizada la construcción de la toma de aguas, el túnel de conducción, la cámara disipadora y el canal de conexión. La duración total es de 190 días hábiles, esto según lo indicado a nivel general en el informe de ingeniería (ICE, 2018). Estas dos obras se contemplaron en el diseño del proceso constructivo de las obras de desvío, debido a la dependencia que ya se explicó. Sin embargo, no forman parte como tal de las obras desvío ni de la maniobra de desvío, por lo que no fue parte del alcance de este proyecto.

5. Metodología

Este trabajo final de graduación se realizó como trabajo ad honorem para Senara. El proyecto se dividió en 4 etapas: recopilación y análisis de la información, determinación de la estrategia para la excavación y movimiento de tierras, generación del plan de trabajo de las obras, y por último, el desarrollo de los requerimientos de obra. De esta forma, el modelo 3D fue generado mediante el programa Civil 3D y la programación de la obra fue realizada con ayuda de MS Project. A partir de la integración de estos, el modelo 4D, que permitió el análisis del proceso constructivo, pudo ser construido mediante el programa de Navisworks. Asimismo, para el desarrollo de las memorias de cálculo se utilizó MS Excel. Por lo tanto, mediante la integración de toda esta información generada, se logró obtener eficazmente el diseño del proceso constructivo de las obras.

5.1. Recopilación y análisis de la información

Al realizar este proyecto se contó con diferentes fuentes de información, de las cuales se obtuvieron aproximadamente 45 Gb de información distribuida en carpetas. Dicha información fue obtenida con la colaboración de la dirección técnica de PAACUME, así como del Ing. Arvin Artola Reyes. Luego, se requirió de una selección útil de información, específicamente de las obras de desvío; así como de su posterior análisis y uso. A continuación, se muestran las etapas de recopilación y análisis de datos:

- Se recopiló y analizó la información disponible del proyecto PAACUME (planos, informes, estudios, etc.), como el estudio de factibilidad del proyecto (Senara, 2018), el informe de logística y estrategia en la construcción del canal auxiliar a lo largo del Canal Oeste, Tramo II (Senara, 2020), y el informe técnico de diseño (ICE, 2018), además de otros documentos importantes para la planificación del proyecto.
- Se recopiló y analizó información bibliográfica de proyectos similares desarrollados en el pasado, con procesos constructivos similares, como el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís.
- Se realizaron reuniones en las cuales se consultó a expertos en el diseño y construcción de este tipo de obras, como a Jonathan Cortes Mena, ingeniero geotécnico encargado del diseño de este mismo proyecto y otros similares.

La información recopilada fue analizada mediante una exhaustiva revisión de los documentos que ya se mencionaron, y a partir de esto, se obtuvieron las especificaciones técnicas y los diseños de las obras a realizar, así como otros aspectos importantes para el desarrollo del trabajo. Además, se logró comprender el problema y los retos del proyecto, específicamente el lograr que las obras de desvío desvíen ambos flujos de agua para poder secar el sitio de presa y seguir manteniendo el caudal ecológico, así como el elevar el nivel del canal de riego sin interrumpir el funcionamiento normal del riego para no afectar a los usuarios. Finalmente, con dicha información, se analizaron las limitaciones y los alcances del proyecto (los aspectos que se incluirían o no en este trabajo final de graduación).

5.2. Determinación de la estrategia para la excavación y movimiento de tierras

La estrategia para la excavación y movimiento de tierras se basó fundamentalmente en dos aspectos, la excavabilidad y condiciones del terreno, y el diseño de sitio. Lo anterior se fundamentó a través de un análisis de rutas cortas para el transporte de los materiales y el aprovechamiento de los recursos disponibles como eje transversal de la estrategia. Esta estrategia funcionó como guía para determinar el plan de trabajo que se mostrará más adelante, de acuerdo con los requerimientos técnicos y constructivos establecidos en el informe de diseño del proyecto y por la administración técnica de PAACUME. Finalmente, es importante mencionar que, la propuesta de excavación y movimiento de tierras se determinó únicamente para las excavaciones de las obras de desvío. No contempla las excavaciones a realizar en los tajos, debido a que esto se abarcó en el informe de ingeniería (ICE, 2018).

5.2.1. Determinación de la excavabilidad del terreno y su estrategia

La excavabilidad es la facilidad que tiene un terreno para ser excavado. Para determinarla se realizó un análisis de la velocidad de onda sísmica del terreno. Se comparó la velocidad de onda sísmica del terreno a excavar con los rangos de velocidad de onda sísmica definidos por la literatura, los cuales definen qué tan ripable es el suelo. La ripabilidad es el proceso mediante el cual una roca puede ser fragmentada o excavada del terreno donde se ubica, originalmente mediante el uso de ripper. Como regla general, para velocidades de onda sísmica por debajo de 2000 m/s cualquier material es ripable, mientras que, por encima de 2500 a 3000 m/s se ripa con extrema dificultad y un costo muy alto (Vallejo, 2002).

La velocidad de onda sísmica del terreno se determinó según el plano de “Geología de los sitios de obra” (Ver Anexo 3), en donde, a partir de la estratigrafía del terreno, se pudo observar el dato de velocidad de onda sísmica. De acuerdo con las unidades geomecánicas definidas en el proyecto, las excavaciones de las obras de desvío se deben realizar en las unidades UG 04 y UG 05. Se realizó un cuadro comparativo entre la regla general de excavabilidad mencionada y los datos obtenidos de velocidad de onda sísmica para cada unidad geomecánica, y de esta manera se determinó su excavabilidad. Esto permitió validar y definir también el tipo de maquinaria y equipo a utilizar en estas excavaciones.

Para determinar la estrategia de excavación y movimiento de tierras se tomó en cuenta la excavabilidad obtenida del terreno, el material a utilizar definido en el Capítulo 4 (en donde se destacó el uso de la ignimbrita para dar provecho del material disponible), los requerimientos de las obras, el criterio profesional propio y el documento de especificaciones técnicas para la construcción de obras de riego y avenamiento de Senara (2018). En este documento se presentan algunas especificaciones para las excavaciones de este tipo de obras, y precisamente se menciona que se puede utilizar el método de excavación que se considere más conveniente para aumentar los rendimientos.

Asimismo, se debió realizar una propuesta de los materiales a utilizar mediante un análisis de la información de los tajos disponibles, debido a que estos materiales no se tenían definidos con claridad en el informe de diseño. Se consideró utilizar el material del tajo de ignimbritas debido a que es el material con mayor disponibilidad en el sitio de las obras, de donde se extraerán aproximadamente 1 800 000 m³ de material. Además, este tajo se encuentra entre 0,5 y 2 km de distancia a las obras, por lo tanto, es mejor aprovechar de este material disponible y evitar comprar material en otros sitios. Asimismo, el tajo presenta bajo porcentaje de absorción (3,32%), por lo tanto, este es un criterio de gran importancia debido a que se utilizará para obras de retención de agua.

Finalmente, mediante consultas realizadas al Ingeniero Osvaldo Quirós de Senara, se determinó que no se utilizará revestimiento superficial en los diques o canales a construir, a excepción de la cara aguas arriba de

la ataguía principal, en donde ya estaba definido que se utilizará una protección mediante una geomembrana HDPE y un Rip Rap. De esta forma, se realizó una propuesta mediante etapas constructivas para la excavabilidad, mediante un cuadro separado en 3 etapas, para lo cual se tomó en cuenta desde la limpieza del terreno, hasta el acabado final de las excavaciones y perfilado de taludes. Esto permitió definir más adelante el plan de trabajo y las actividades específicas de cada etapa, lo que permitió también, establecer el orden de los trabajos.

5.2.2. Diseño de sitio

Para el diseño de sitio de las obras de desvío del río y el canal de riego, se tomó en cuenta la ubicación de las escombreras, tajos, caminos y sitios de las obras de desvío, así como de otras obras generales que se determinaron en el informe de ingeniería (ICE, 2018). Para la logística de acarreo de materiales se realizó un análisis de las rutas al tajo y a las escombreras, el cual fue determinado con este diseño de sitio; y se determinó que las escombreras más cercanas a las obras de desvío eran las mejores a utilizar, con lo que se buscó maximizar la eficiencia de las operaciones.

Se definió una escombrera que no estaba planificada cercana a las obras de desvío para poder almacenar la roca de gran tamaño que se explote en las voladuras de las laderas del sitio de presa, poder almacenarlas más cerca y así poder utilizarlas en los diferentes rellenos o Rip Rap.

Se mostró una vista general con la ubicación del proyecto y las principales obras del proyecto PAACUME. Luego, por medio de los planos facilitados por Senara (Ver Anexo 1), los cuales se cargaron al Civil 3D, se realizaron las modificaciones respectivas a partir de esto, agregando así la escombrera que se propuso, con lo que se obtuvo gráficamente el diseño de sitio. Con el diseño de sitio definido, se obtuvo más adelante, como parte de la logística de materiales, una adecuada gestión de los espacios. Se destacó que, tanto las rutas de acarreo eran adecuadas debido a que se buscaron las rutas más cortas, como que, el espacio de trabajo fue el adecuado para las cuadrillas determinadas.

5.3. Generación del plan de trabajo de las obras

Para el plan de trabajo, primeramente, se definieron las actividades a realizar en la construcción de las obras. Luego, se determinó el orden de los trabajos. Seguidamente, se determinó la logística del acarreo de los materiales. Se realizó la conformación de las cuadrillas de trabajo y los requerimientos de equipo y maquinaria. Finalmente, se identificaron los riesgos y limitaciones que se pueden presentar en la construcción de las obras.

5.3.1. Definición de las actividades y el orden de las actividades

Se consideró la estrategia para la excavación y movimiento de tierras propuesta a partir de la excavabilidad y el diseño de sitio, y las obras que se deben desarrollar. Se consideró que tanto el desvío del Río Piedras, como el desvío del canal de riego, deben estar terminados en el momento que se inicie con la excavación del sitio de presa. Se consideraron aspectos técnicos de diseño, el tipo de excavabilidad, el momento en que se realizará debido al posible aumento en el caudal del río (invierno o verano), la necesidad de tener un flujo constante del canal de riego para evitar el desabastecimiento de los usuarios, y tener presente la no suspensión de servicio por mucho tiempo. Asimismo, se tomó en cuenta la construcción de las alcantarillas de descarga de fondo y el túnel de conducción, la toma de aguas y el canal de restitución para definir las actividades de desvío. Sin embargo, esas obras no formaron parte del alcance de este proyecto, únicamente se tomaron de manera global, con duraciones globales. De esta manera, se conoció en qué

momento se iniciaría con la construcción de las obras de desvío que dependían de estas otras obras que no se abarcaron de manera específica.

Se tomaron en cuenta algunas recomendaciones realizadas por expertos en el diseño y construcción de este tipo de obras, entre ellos el Ing. Jonathan Cortes Mena, encargado del diseño del proyecto PAACUME, y algunos profesores de la escuela de Ingeniería en Construcción, como la Ing. Ivannia Solano Aguilar y el Ing. Andrés Araya Obando.

A partir del método CPM (método de la ruta crítica) se determinaron las actividades del proyecto. Este método permitió tener un apoyo visual de la secuencia de las actividades para así, poder determinar cuáles actividades no estaban comprometidas con los periodos de tiempo. El método se terminó con ayuda del software de MS Project posteriormente, donde se pudo determinar la programación y la ruta crítica de las obras. El primer paso fue identificar y enumerar las actividades para poder tenerlas presentes en todo momento.

Asimismo, se definió la Estructura de Desglose de Trabajo (EDT), en la cual, también se basó la definición de las actividades y el orden de estas. La EDT es una “descomposición jerárquica, basada en los entregables del trabajo que debe ejecutar el equipo del proyecto, para lograr los objetivos del proyecto y crear los entregables requeridos, con cada nivel descendente de la EDT representando una definición cada vez más detallada del trabajo del proyecto” (PMBOK, 2017). Por lo que, es una especie de mapa mental estructurado, a través del cual se fracciona el proyecto en componentes más pequeños con el fin de simplificar su planificación y control (Alán, 2021). Para lograr la EDT se realizó un desglose desde las actividades u obras más significativas, hasta otras más específicas. En donde se inició con el nombre del proyecto, seguido del primer nivel de desglose donde se mencionaron todas las obras de desvío. Lo que no formó parte del alcance de este proyecto no se incluyó en la EDT.

Se consideraron las actividades definidas anteriormente para definir el orden. El diseño de las obras fue de gran importancia para determinar este orden de los trabajos debido a que, implica que primeramente se realicen unas obras para poder construir otras, y así darle el correcto funcionamiento al desvío del río y el desvío del canal de riego. Es decir, existe dependencia de unas obras para poder construir otras. El orden se definió con ayuda de las consultas realizadas a los expertos ya mencionados. Se estableció el orden de las actividades de manera que, algunas actividades se realizaran en paralelo a otras, y que unas se iniciaran una vez finalizadas sus predecesoras. Más adelante se puede ver como las simulaciones constructivas permitieron ajustar este orden de manera más eficiente.

El periodo de tiempo de construcción de las alcantarillas de desvío, y el túnel de conducción y las obras asociadas es muy grande (205 días y 190 días, respectivamente), debido a la magnitud de esas obras. Por lo que se propuso que esas obras iniciaran unos meses antes del inicio del desvío como tal. Se propuso que la excavación del canal auxiliar que dirigirá el río a las alcantarillas de descarga de fondo se iniciara un poco antes de comenzar a construir las alcantarillas para tener mayor facilidad de acceso al sitio donde estas se construirán, y a su vez, ir adelantando esta tarea. Se propuso que la construcción de las alcantarillas de descarga de fondo (la cual incluye una sustitución de grandes dimensiones del suelo por concreto en su base) deberá iniciar luego de excavada la primera parte del canal auxiliar.

La estructura de desglose de trabajo fue de gran ayuda para definir el orden de las actividades, debido a que, permitió visualizar de mejor manera las actividades por realizar en cada elemento u estructura de las obras de desvío. Asimismo, la estrategia para la excavación y movimiento de tierra de las obras de desvío, y la construcción de las presas y canales de desvío fue de gran importancia para establecer la manera en que se realizará cada estructura y el orden de cada actividad.

Así como algunas obras dependen de otras, hay obras que no dependen de ninguna. Por este motivo, se propuso que se ejecutaran actividades en paralelo, y de esta manera adelantar trabajos para poder cumplir

de manera eficiente los plazos establecidos. Se realizó un cuadro donde se muestran las precedencias de cada actividad y el orden de estas.

5.3.2. Logística de acarreo de materiales

Se definió la logística del acarreo de materiales tomando en cuenta el diseño de sitio. Este permitió ver la ubicación de las obras de desvío, los tajos, las escombreras y los caminos de acceso. Se realizó la gestión de espacios para cada material, el acopio y acomodo de estos. Se tomó en cuenta también la carga y descarga, y el almacenamiento que se le dará a los materiales. Para lograr determinar esta estrategia se tomó como base algunas consideraciones indicadas en el informe de ingeniería del ICE (2018), tal como que, el material debe ser extendido mediante un tractor, lo cual debe ser realizado de manera ordenada y por capas.

Al tener las escombreras y las fuentes de material cerca de los sitios de obra, únicamente será necesario utilizar vagonetas para el acarreo de los materiales. Estos serán materiales provenientes de excavaciones de suelos, por lo que, presentarán abultamiento, lo cual se consideró al momento de calcular la cantidad de viajes que serían necesarios para acarrear los materiales de un punto a otro y poder concluir la obra. Con esto, se realizó un análisis de las distancias más cortas entre las escombreras y tajos disponibles, y las obras en cuestión, lo cual se realizó sobre la red de caminos que se determinó en el diseño de sitio. Este análisis permitió también, ver los viajes por hora de cada ruta, y por ende, los rendimientos de cada ruta de acarreo. Con este análisis se determinó entonces, a cuál escombrera serán llevados los materiales extraídos de cada obra a excavar, dependiendo de cual ruta presentó el mayor rendimiento.

Primeramente, se determinaron las distancias entre punto y punto a analizar. Luego, se definió como base una velocidad máxima de transporte de 15 km/h. También, se definió un 20% de abultamiento del material, ya que la vagoneta es de 23 m³ de capacidad, pero en banco. Esto se debió ajustar debido al abultamiento que presenta el material luego de excavado (la regla normalmente es de 30%. Sin embargo, según O. Quirós, comunicación personal, (2022), el material a acarrear es mayoritariamente granular, por lo que el abultamiento no es tan alto). Asimismo, se definió un 50% de abultamiento para el desmonte y la limpieza, debido a que contiene una gran parte de material orgánico y ramas de árboles o arbustos. Con esto, se determinó la duración de cada viaje, luego la cantidad de viajes por hora, y finalmente, el rendimiento esperado por hora para el transporte del material. Es importante mencionar que, cualquier modificación en la capacidad de carga de la vagoneta o en su velocidad, así como las distancias entre cada punto, pueden ser modificadas con facilidad en una hoja de cálculo que se realizó en MS Excel, ya que, automáticamente se cambiarán las duraciones totales de esta actividad.

Es importante recordar que, la escombrera 4 es una escombrera temporal para almacenamiento únicamente de material aprovechable. Por este motivo, únicamente se consideró esta ruta hacia la escombrera 4 en el caso de que los materiales se tomaran de ahí, como es el caso del material proveniente de las voladuras del sitio de presa, que se puedan utilizar en los rellenos de los diques. Los materiales excavados de las obras de desvío no serán aprovechables, y por ende, se definió que se llevaran a escombreras permanentes. Asimismo, la logística de acarreo de materiales se definió como una lista de consideraciones que deberán ser acatadas al momento de transportar y almacenar los materiales.

5.3.3. Conformación de cuadrillas de trabajo

Debido a que estas son obras en donde los trabajos a realizar se deben hacer con maquinaria pesada, las cuadrillas de trabajo corresponden a los operarios de esa maquinaria. Se definió personal como ayudantes o peones para realizar los trabajos de compactación manual y colocación de las alcantarillas para la escorrentía de agua superficial.

La cantidad de personal se ajustó a las obras de este proyecto. Se tomó como referencia los valores de rendimiento y conformación de cuadrillas de los trabajos realizados en proyectos de tipología similares (Proyecto Hidroeléctrico Pirrís), por lo que los rendimientos son muy similares a lo que se esperará tener en la construcción de las obras de desvío. Se tomaron algunas referencias bibliográficas para la determinación de los rendimientos, mano de obra y maquinaria. En estas referencias se menciona maquinaria, rendimientos y mano de obra utilizada en el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, desarrollado por el ICE, dentro de los cuales están: Análisis de opciones para la excavación de la Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (Bonilla R., Castillo E., Corrales K., 2002), y Análisis de productividad y rendimientos de operaciones y procesos de obra gris de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (Navarro Brenes K., 2010). También, se tomó como referencia el proyecto realizado sobre el sitio de presa del proyecto PAACUME: Diseño del plan de ejecución BIM para la construcción del Sitio de Presa y Casa de Máquinas en el Embalse Río Piedras - Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME) (Artola & Roldán, 2021), donde se definen rendimientos y mano de obra para esas obras. También se definió una cuadrilla típica que apoyará el trabajo de planificación y ejecución de las obras.

Se realizó una hoja de cálculo de MS Excel (Ver Apéndice 1), en la cual ya se tenían las actividades definidas. Se añadió una columna con las cantidades de volumen para cada una. Se calcularon las horas totales para cada actividad mediante el rendimiento definido (esto se determinó más adelante). Finalmente, se añadió una columna que integra la cantidad de recursos necesarios por cada actividad como se puede ver en la Figura 11.

			Rendimientos					
Nombre de Actividad	Cantidad de Actividad	Unidad	Operario Tractor de Oruga (D6)	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	Operario Back-Hoe	Operario Sapo Brincón	Operario Excavadora Hidráulica PC 300
Unidades	-	-	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ² /h	m ³ /h

Duraciones								Recursos
Total Operario Tractor de Oruga (D6) (h)	Total Operario Vagoneta Articulada CAT 740 (h)	Total Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON) (h)	Total Operario Back-Hoe (h)	Total Operario Sapo Brincón (h)	Total Operario Excavadora Hidráulica PC 300 (h)	Duración Total de la Obra (h)	Duración Total de la Obra (Días)	Cantidad Operario Tractor de Oruga (D6)
h	h	h	h	h	h	h	Días (12h)	U

Recursos				
Cantidad Operario Vagoneta Articulada CAT 740	Cantidad Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	Cantidad Operario Back-Hoe	Cantidad Operario Sapo Brincón	Cantidad Operario Excavadora Hidráulica PC 300
U	U	U	U	U

Figura 11. Tabla de rendimientos, recursos, cuantificación y duración de las obras de desvío.

A pesar de que se tomaron esos valores de mano de obra de los proyectos de referencia que ya se mencionaron, se realizó un ajuste a las obras tratadas en este proyecto. Este ajuste se determinó mediante la hoja de cálculo de Excel. En donde, a partir de la mano de obra necesaria, se varió la cantidad de los recursos y se determinó cual configuración de cuadrillas se adaptaba mejor a las obras. Para esto, se tomó en cuenta el espacio requerido en cada obra, así como el radio de giro de la maquinaria y el tiempo de duración de las obras que representaba variar la cantidad de recursos a utilizar. Además, se realizó una

propuesta de una cuadrilla típica de apoyo a las obras según lo definido en el PH Pirrís (Bonilla R., Castillo E., Corrales K., 2002).

5.3.4. Requerimientos de equipo y maquinaria

Según las especificaciones técnicas del proyecto ICE (2018), el material será extraído de canteras cercanas al sitio mediante excavadoras hidráulicas, transportado por vagonetas, extendido por tractores y compactado por rodillo. Asimismo, según lo determinado por la excavabilidad del terreno, este equipo es el adecuado. Además, se consideró que la maquinaria del ICE, utilizada en el proyecto Hidroeléctrico Pirrís, es la que tiene mayor probabilidad de ejecutar las obras, debido a que es la empresa que ha llevado a cabo proyectos con características y dimensiones similares en el país. Asimismo, se consideró también maquinaria de otro tipo y se vieron sus rendimientos, para poder seleccionar la más adecuada al proyecto.

De esta forma, se propuso la maquinaria definitiva luego de haber realizado un análisis de los rendimientos de estas y de haberlos comparado con maquinaria similar. Esa comparación permitió concluir que la maquinaria propuesta anteriormente tiene las especificaciones necesarias para ser utilizada. Además, mediante los rendimientos, se verificó la duración de la ejecución de las actividades con esta maquinaria, lo que permitió observar que, efectivamente se logró aproximar a los plazos establecidos para la construcción de las obras. Asimismo, se determinó que los rendimientos no contemplaban tiempos muertos, debido a que eran rendimientos teóricos basados en manuales de la maquinaria. Por lo tanto, se consideró el tiempo muerto para esos rendimientos de maquinaria (tiempos de conversar, merendar, coordinación con el encargado de maquinaria pesada, tiempo de ir al baño, llenado de combustible de la maquinaria, tiempos de lluvia en exceso, etc). Como no se conocía el dato exacto, se estimó un 15 % del rendimiento como tiempo muerto, el cual según O. Quirós, comunicación personal, (2022), considera tiempos desde hablar, ir al baño o cualquier tiempo no productivo, y que en general se puede durar más de dos horas de tiempos muertos, por lo que se consideró una jornada laboral de 12 horas, y por lo tanto un 15 % de tiempos muertos es adecuado y aproximado.

Se realizó un cuadro que definió la maquinaria para cada tipo de tarea a realizar en el proyecto, y que presenta el rendimiento final, luego de considerar los tiempos muertos. Estos rendimientos fueron comparados con los rendimientos de otro tipo de maquinaria con especificaciones y propósitos similares, y con esto, se determinó que la maquinaria propuesta cumple con lo estipulado por el informe de ingeniería (ICE, 2018), así como con la maquinaria que se ha utilizado anteriormente en proyectos similares en el país. Además, se realizó una lista con criterios y consideraciones a tomar en cuenta al momento de adquirir y utilizar la maquinaria o equipo.

5.3.5. Identificación de riesgos y limitaciones en las obras

Es importante considerar riesgos y limitaciones a la hora de realizar o construir una obra, por lo que, en este proyecto no fue la excepción. Estos se determinaron mediante las recomendaciones de expertos y el análisis de proyectos de este tipo, construidos en el país y a nivel internacional, en donde se han presentado emergencias de gran magnitud, y por ende, grandes atrasos. De esta forma, se lograron identificar los posibles riesgos y limitaciones a nivel general de este proyecto. Asimismo, se tomó en consideración lo indicado por la guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK), donde se indica que “identificar los riesgos es el proceso de identificar los riesgos individuales del proyecto, así como las fuentes de riesgo general del proyecto y documentar sus características”. Además, menciona que, este proceso se lleva a cabo a lo largo de todo el proyecto, por lo que, es poco probable que se hayan descrito o identificado la totalidad de riesgos y limitaciones existentes, ya que el alcance de este proyecto no abarca la totalidad del proyecto PAACUME. Sin embargo, se realizó una lista para las obras de desvío del Río Piedras y el canal de riego, con base en el análisis mencionado anteriormente.

5.4. Estimación de los requerimientos de obra

Se determinaron las cantidades de los materiales de las obras mediante el modelo 4D que se construyó gracias a la integración del modelo 3D y la programación de las obras. Se realizaron simulaciones digitales del proceso constructivo, esto permitió verificar y ajustar el orden de las actividades. Asimismo, se determinaron las duraciones de las obras con ayuda de la hoja de cálculo presentada en la sección anterior. Para esto, se requirió de los rendimientos y las cantidades de obra que se determinaron. Se realizó una guía que permitirá el uso del modelo 4D de Navisworks para su correcta manipulación y modificación por parte de la dirección técnica de PAACUME.

5.4.1. Determinación de las cantidades de los trabajos

Para determinar las cantidades de material requerido en las actividades, se realizó una cuantificación mediante el modelo 4D realizado en Navisworks. Este modelo requirió de la integración de un modelo 3D que se realizó en el programa Civil 3D y la programación de las obras que se realizó en MS Project. El programa Civil 3D ofrece mejores herramientas para el modelado de estructuras de este tipo, como movimientos de tierra y taludes, diques o canales, y para el cálculo de volúmenes, en comparación con programas como Revit, razón por la cual fue utilizado en este proyecto.

Generación del modelo 3D

Mediante consultas al técnico Olman Salazar, encargado de realizar los planos de dichas obras, se obtuvieron los archivos en Civil 3D, los cuales son superficies de las obras a realizar en el desvío del Río Piedras y el canal de riego. A partir de dichos archivos y mediante la modelación de otras obras más a detalle (ataguía) en el mismo software, se obtuvo el modelo 3D de las obras de desvío.

Dichos archivos se presentaron como archivos .xml, los cuales eran archivos de superficie, por lo que, al cargarlos al modelo, fue necesario darle una georreferenciación, la cual se realizó al sistema de coordenadas de cuadrícula para Costa Rica WGS84.CRTM05, tal y como se muestra en la Figura 12. Asimismo, se les dio propiedades de sólidos para poder cargar posteriormente el modelo a Navisworks.

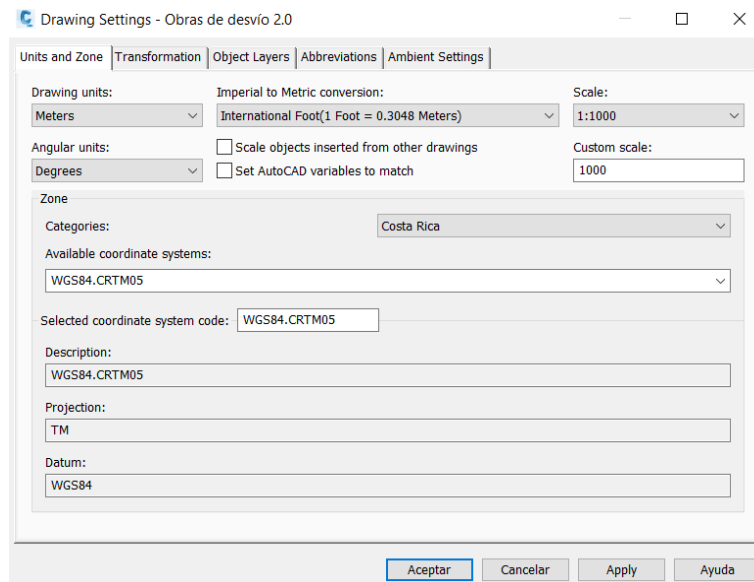


Figura 12. Georreferenciación del modelo 3D.

El modelo de la ataguía se detalló más a profundidad que las demás estructuras, debido a que esta posee una capa de arena, una trinchera para el anclaje de la geomembrana HDPE, y un Rip Rap de protección. Para lograr esto, se utilizó la herramienta de “Subassembly Composer” de Civil 3D, en donde se definió el perfil de esta estructura (ver Figura 13), para luego cargarla al modelo mediante un corredor. Asimismo, en esta parte, se dividió el alineamiento de la ataguía en 5 secciones, para definir de esta manera las partes secas que se construirán primero y las partes más bajas que deben construirse luego de realizados los desvíos. Para definir este subensamblaje fue necesario realizar una programación con parámetros fijos y modificables que se puedan adaptar al perfil de la superficie y a la rasante de la ataguía en el corredor del modelo 3D. Luego, se crearon corredores a partir de esos sub-alineamientos (ver Figura 14), para de esta manera, poder apreciar qué partes se construirán primero. Esto se vio en la simulación creada y presentada más adelante.

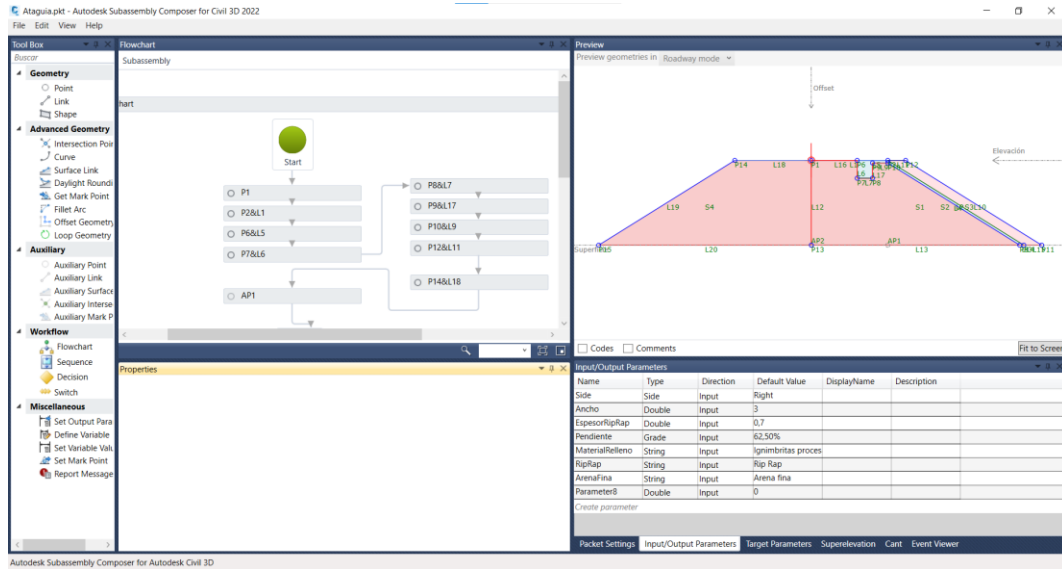


Figura 13. Determinación del subensamblaje para la ataguía.

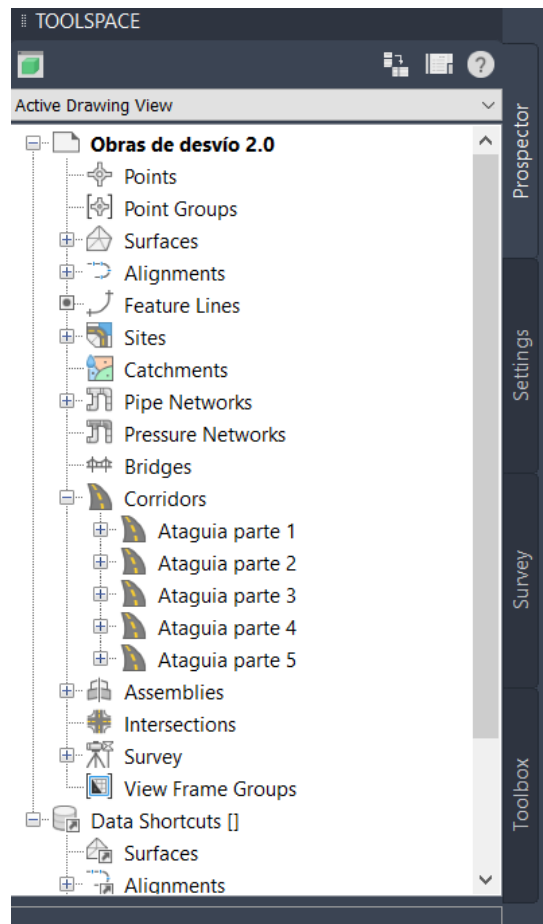


Figura 14. Corredores creados para la subdivisión de la ataguía principal.

Además, para realizar un nivel de caracterización estándar de los elementos, una correcta cuantificación y representación adecuada, se utilizó un LOD de 300. Se determinó el LOD 300 como una representación gráfica de las obras dentro del modelo como un sistema, objeto o ensamblaje específico en términos de cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación (BIMForum, 2020). Asimismo, se incluyó información no gráfica en algunos de los elementos. De esta manera, fue definido y verificado el LOD que se empleó tanto en el modelo 3D como en el modelo 4D que se construyó.

Programación de las obras

La programación de las obras se realizó en el programa MS Project. Se procedió a realizar la programación de las obras de desvío del Río Piedras y del canal de riego. Primeramente, se determinó el calendario del proyecto (Figura 15). Se definió que la jornada laboral será de 6 días de trabajo por semana y 1 día de descanso, lo que se traduce en una jornada de lunes a sábado y domingo de descanso. Asimismo, el horario tendrá una duración de 12 horas diarias, de 6:00 am a 6:00 pm. Se definieron también los días feriados y las vacaciones, tal y como se observa en la Figura 16. Se asignó la fecha de inicio y los detalles de programación específicos de MS Project para que tomara el calendario como realmente se esperaría, tal y como se aprecia en la Figura 17. Luego, se añadieron las actividades, las predecesoras y las duraciones (que se presentan más adelante) en el programa. Con esto, se determinó el diagrama de Gantt que se presentó en el plan de trabajo, para ver con mayor seguimiento y detalle la ruta crítica. Luego, se ingresaron los recursos y las cantidades de estos, para poder determinar si existen sobre asignaciones en

los mismos, y tener una línea base para el cálculo del trabajo y una posible cuantificación de costos, lo cual entraría en la dimensión 5D, y no es parte del alcance de este proyecto.

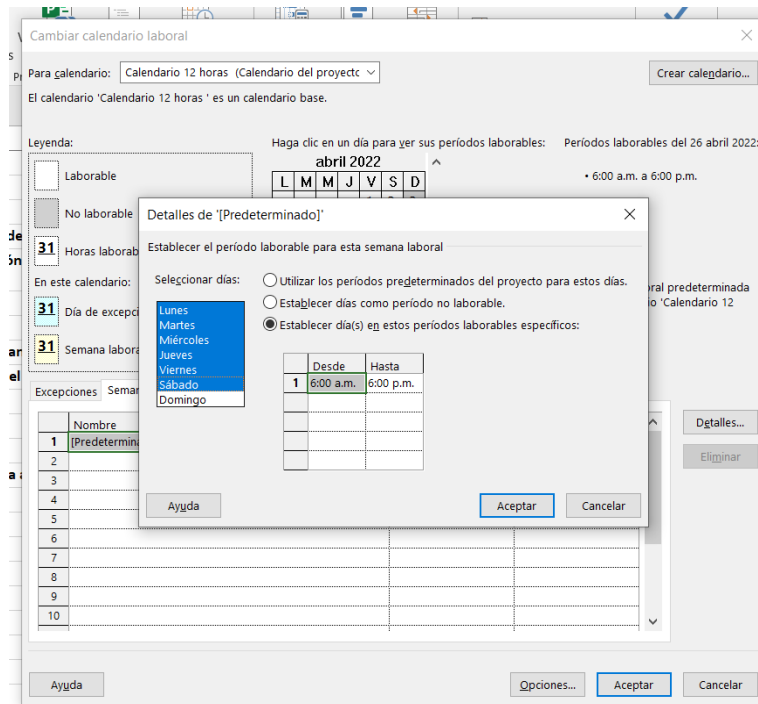


Figura 15. Asignación del calendario de trabajo en MS Project.

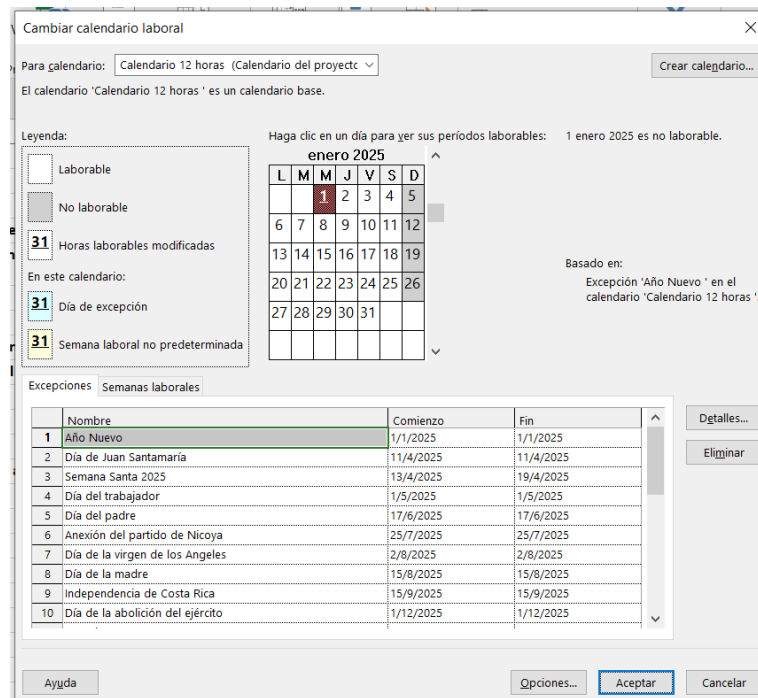


Figura 16. Asignación de fechas de vacaciones y feriados al calendario de trabajo en MS Project.

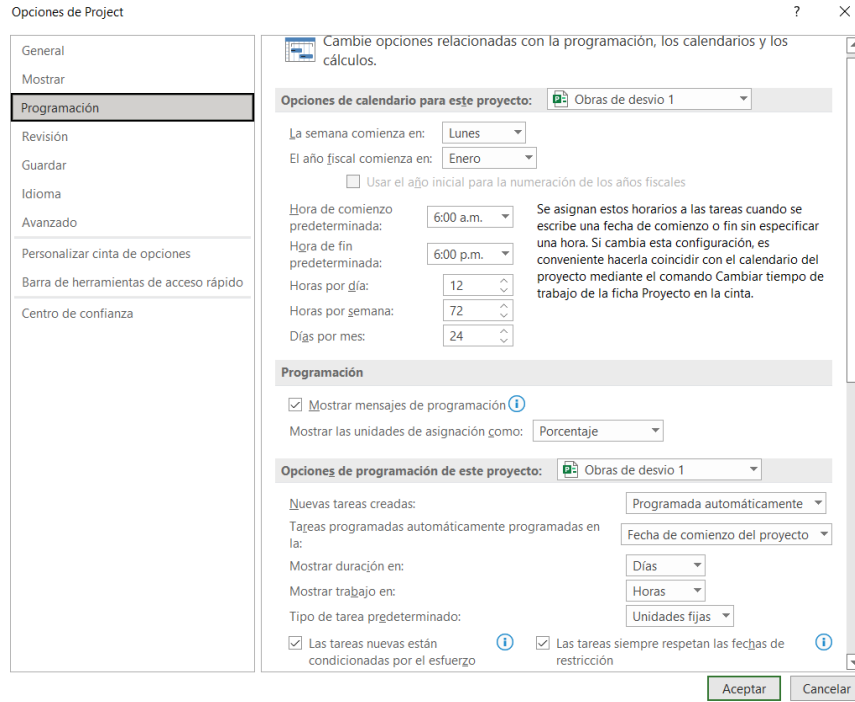


Figura 17. Asignación de opciones de calendario para el proyecto.

Construcción del modelo 4D

El modelo 3D se representó mediante la herramienta “árbol de selección” de Navisworks luego de que se cargó en el modelo 4D, como se muestra a continuación en la Figura 18. Asimismo, se cargó una serie de datos de entrada que complementan el modelo tridimensional, dentro de los cuales están: la lista de actividades, relaciones de las fases constructivas, organización, tipo de trabajo, frentes de trabajo, rendimientos de obra y requerimientos de cuadrillas para cada actividad. Todos estos datos de entrada se ingresaron luego de cargado el modelo 3D.

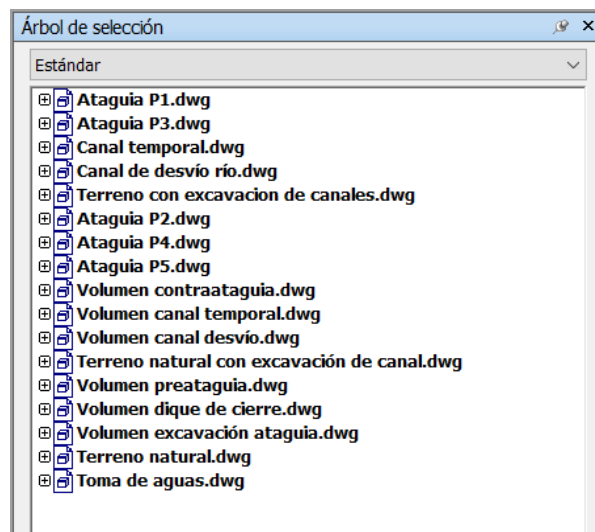


Figura 18. Estructura de elementos definida en Navisworks a partir de Civil 3D.

La información se cargó a Navisworks mediante el archivo de MS Project. Esto se logró asignando el archivo como los datos de entrada o el origen de datos a la herramienta "TimeLiner". De esta manera, se le indicó al programa que creara una nueva línea de actividades para el proyecto. Primeramente, se seleccionó el archivo desde el programa para que este lo pudiera cargar. Luego, se hizo un mapeo de propiedades o parámetros para facilitar la importación y la interpretación de datos por parte del programa, como se muestra en la Figura 19. Allí fue donde se definieron los homólogos de cada propiedad de Project a Navisworks, siendo así que, si en Project el identificador de la actividad es "ID" y en Navisworks "ID de sincronización" se pueda definir que se trata de la misma propiedad.

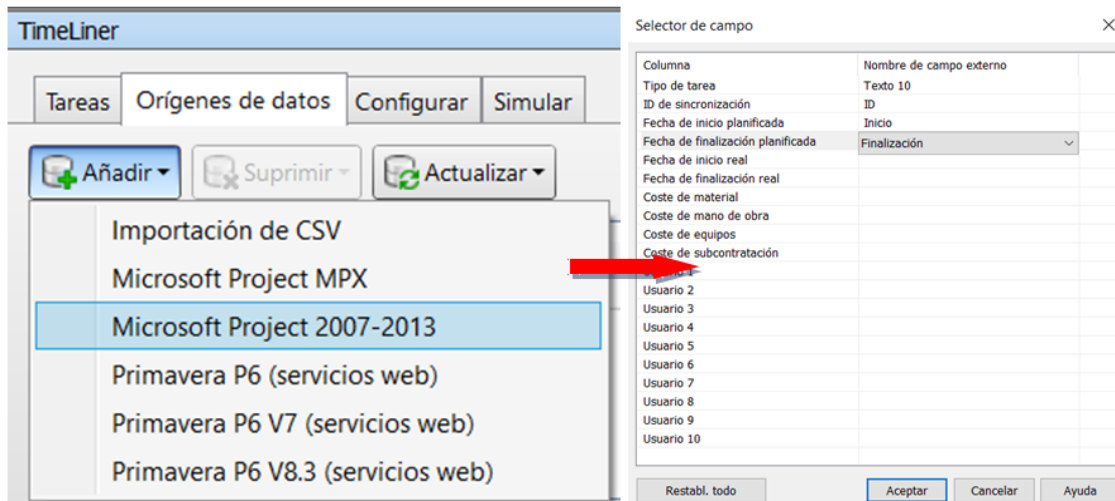


Figura 19. Cargado del archivo de MS Project al Navisworks.

Posterior a que se cargó la lista de actividades y los elementos del modelo 3D, se hizo una relación entre el modelo 3D y la programación de las obras. Este enlazado de la información gráfica con la información de la programación de las obras, permitió realizar las simulaciones constructivas, lo cual se detalla más adelante.

Es importante mencionar que el modelo de Civil 3D se cargó como archivos separados para cada elemento en formato de sólidos, por lo que, no se cargó como un archivo global, y no se actualiza cuando se realizan modificaciones al Civil 3D. Sin embargo, si se requiere hacer esto, se debe reconstruir todo el modelo de Navisworks con el archivo global de Civil 3D, dando propiedades a este último para que sea compatible. Una de las razones por las que no se realizó esto inicialmente, fue debido a que, las superficies de los diques se tomaban como simples superficies y Navisworks no lo tomaba como sólido, por lo que, no se cuantificaba el volumen. A pesar de que los elementos se cargaron como sólidos 3D, y se les intentó dar las propiedades necesarias para una mayor compatibilidad con Navisworks, las propiedades de Civil 3D pueden tener identificaciones diferentes a las de Navisworks. A manera de ejemplo y como se muestra en la siguiente imagen (Figura 20), en civil 3D el parámetro "Volume" sería "VolumenModelo" en Navisworks, y esto podría generar que no se mapeen algunas propiedades que se quieran cuantificar.

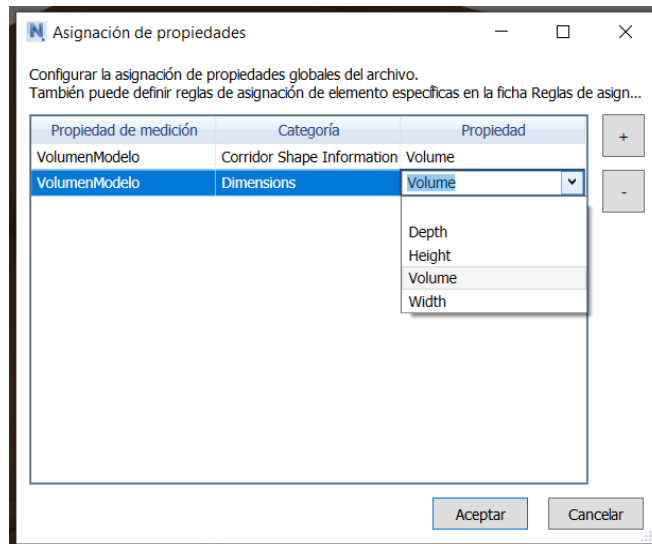


Figura 20. Mapeo de propiedades para cuantificación

Cantidades de material

Luego, mediante el modelo 4D construido, se realizó la cuantificación de los elementos de las obras de desvío. Se realizó una cuantificación de elementos por catálogo, basado en el árbol de selección, como se muestra en la Figura 21, y se obtuvieron las cantidades. Estas fueron ingresadas a la hoja de cálculo para calcular las duraciones totales de la obra. En la Figura 22 se puede observar cómo se ve la cuantificación de un elemento en el Navisworks. Para esta cuantificación, se debió realizar un enlazado similar al realizado para las actividades, el cual se detalla más adelante, en donde se realizaron grupos de estructuras o elementos a cuantificar y se enlazaron con los elementos del modelo. Además, se seleccionaron los parámetros que se deseaban medir.

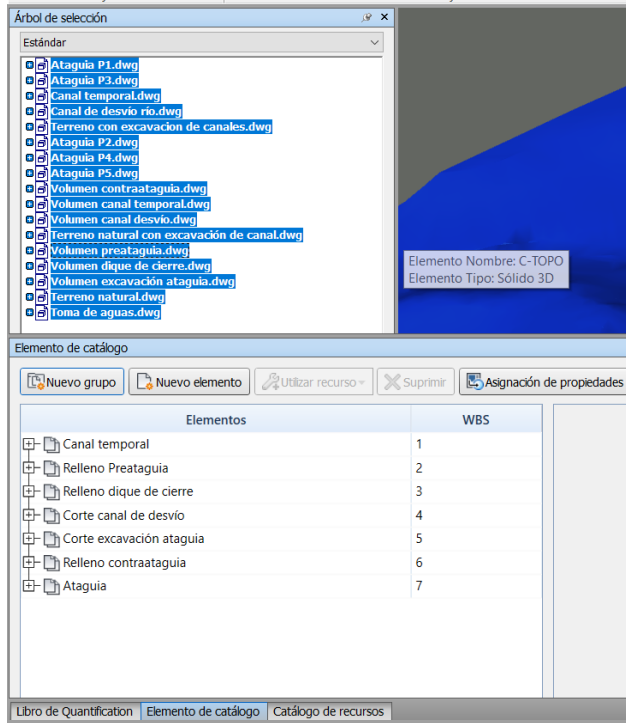


Figura 21. Proceso de cuantificación con base al árbol de selección.

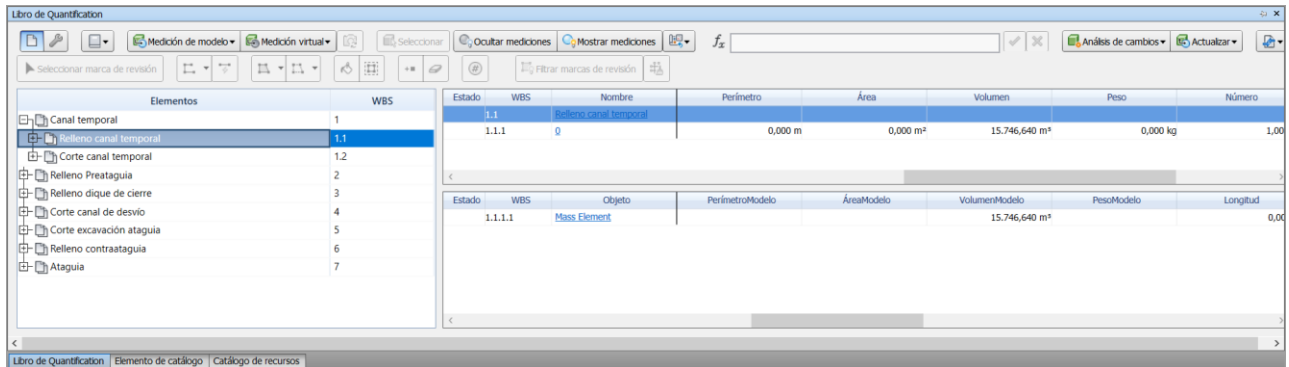


Figura 22. Libro de cuantificación de las obras de desvío.

Ahora bien, con las cuantificaciones de los materiales de las obras, se tabuló cada elemento con su respectiva cantidad de material. De esta manera, se obtuvieron las cantidades de material volumétrico para cada elemento, y seguidamente, en corte o en relleno, se realizó un gráfico con la ordenada masa de cada obra. Es decir, se restó el volumen de relleno al volumen de corte y se graficó. Con esto, se obtuvo un análisis de los volúmenes de material que se moverán.

5.4.2. Duración de los trabajos

Una vez que se tuvieron las cantidades definidas, se calculó la duración de cada una de las actividades mediante la hoja de cálculo de MS Excel descrita en la sección 5.3. Asimismo, y como ya se mencionó, para el cálculo de las actividades de transporte de materiales, se realizó un análisis de la red de caminos establecida en el diseño de sitio, y con esto se logró determinar cuál recorrido podría tener el mayor

rendimiento para disminuir los tiempos de trabajo y los costos de la obra. Además, la duración se calculó como el producto de los rendimientos por las cantidades de trabajo.

Rendimientos de obra

Los rendimientos fueron utilizados para determinar la duración de las obras. Estos ya se expusieron en la sección de maquinaria y equipo debido a que, también formaron parte del criterio de selección de la maquinaria. Como se mencionó, fueron determinados a partir de rendimientos utilizados en otros proyectos similares realizados en Costa Rica, y se consideró el tiempo muerto o no productivo, el cual no se había contemplado.

Duraciones de las actividades

Como se mencionó, se obtuvo el producto entre los rendimientos determinados y las cantidades de obra para calcular las duraciones mediante la hoja de cálculo de MS Excel. Se realizó un cuadro con las duraciones para cada obra. Seguidamente, se cargó las duraciones al archivo de MS Project para poder determinar de mejor manera el cronograma de trabajo y se logró definir con mayor certeza las fechas de inicio y fin de cada actividad en la programación.

Simulaciones

Continuando con el modelo 4D, se procedió a dar relación constructiva entre las actividades y los elementos tridimensionales, lo cual, fue realizado con la herramienta de “TimeLiner”, como se presenta en la Figura 23. Para dar esa relación se utilizó la herramienta “Enlazar”, para lo cual, se seleccionaron los elementos y la actividad de la programación, y se indicó que se enlazara esa selección. Asimismo, se definió el tipo de actividad, ya sea construcción, demolición o construcción temporal, lo cual se realizó para cada actividad, como se aprecia en la Figura 23. A pesar de que ya se contaba con las predecesoras de cada actividad y un orden lógico de estas, las simulaciones mediante la herramienta “TimeLiner” como se ve en la Figura 24, lo que permitió corregir algunos frentes de trabajo o procesos que se daban al mismo tiempo, y no era lo adecuado.

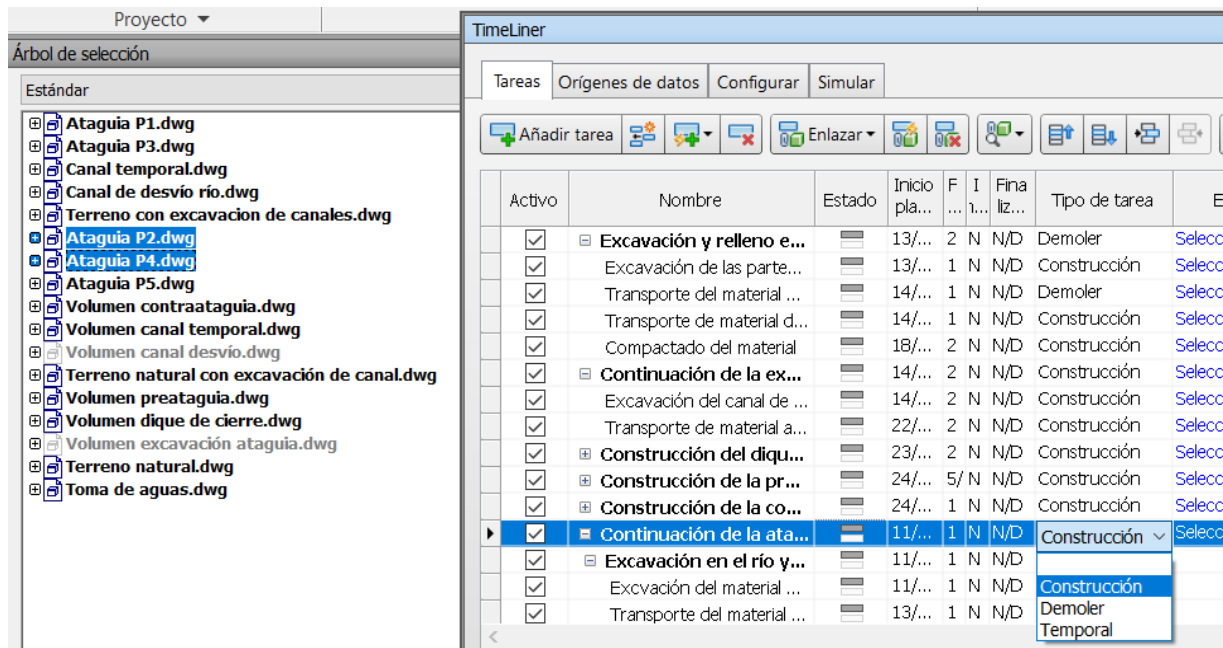


Figura 23. Enlazado de las actividades con los elementos tridimensionales y asignación del tipo de tarea.

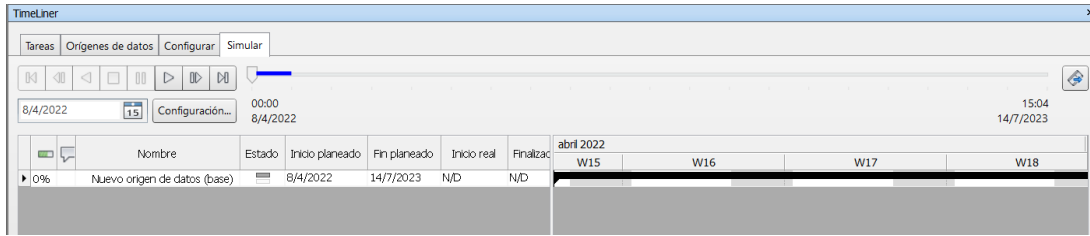


Figura 24. Creación de las simulaciones constructivas.

Se cargaron diferentes versiones del terreno con y sin excavaciones al modelo 4D, lo cual permitió que, simulara que el terreno original se excavaba y luego aparecía el terreno con la excavación, simulando ese movimiento de tierras. A pesar de que se modeló con Civil 3D, programa que permite con mayor facilidad el modelado de movimiento de tierras, para poder visualizarlo como un proceso constructivo sigue siendo de gran complejidad debido a que, no se tienen las capas de cada compactación como irían apareciendo en la realidad.

La simulación se utilizó para validar el proceso constructivo y notar errores en el mismo. Estos errores fueron tales como; que una actividad iniciaba antes de terminar otra actividad, y no era posible debido a las dependencias entre una obra y otra. Esto fue una gran ayuda para determinar correctamente la propuesta del diseño del proceso constructivo. Se analizó la simulación y se identificaron precedencias que debían modificarse, así como holguras significativas que existen mientras se construyen otras partes de gran importancia para el proyecto (las obras que se vayan realizando al mismo tiempo, y por ende, los frentes de trabajo). Una vez que se determinó la relación correcta entre actividades y elementos tridimensionales, se actualizó la información en Project, la cual ya tenía los datos de duración que se calcularon anteriormente. Esto permitió que se actualizara la conexión de datos entre el modelo de Navisworks y el archivo de MS Project. La sincronización entre ambos archivos es de gran importancia para mantener esa integración de información, por lo que, a continuación, en la Figura 25, se presenta la forma en que se realizaron esas sincronizaciones.

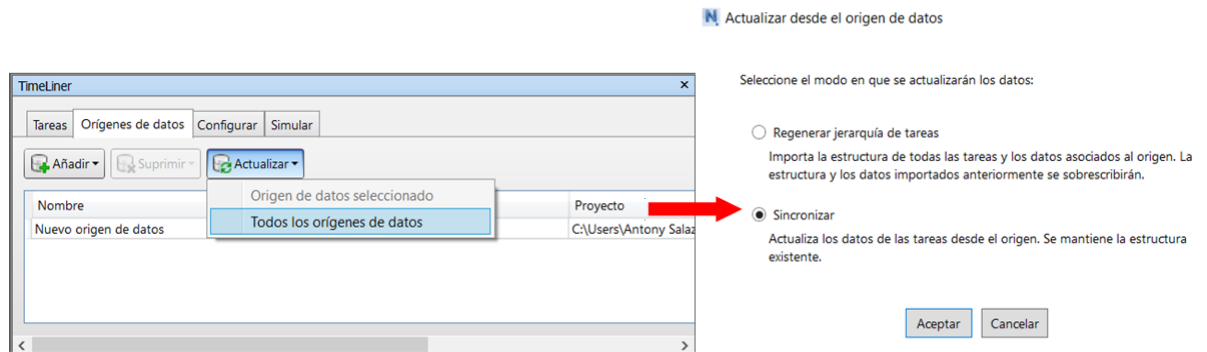


Figura 25. Sincronización de la relación entre Navisworks y MS Project.

Se realizó una simulación final del proceso constructivo contemplando las duraciones finales, donde se muestra una aproximación al proceso que se dará en la realidad de la ejecución de las obras.

5.4.3. Generación de la guía para el uso del modelo 4D

Por medio de la experiencia y la curva de conocimiento generada para el manejo de programas de modelado en el desarrollo del proyecto, y específicamente, en el desarrollo del modelo 4D de Navisworks, se conoció a detalle los pasos a seguir para generar un modelo 4D en este software. Se conoció cada elemento y actividad definida en el mismo, y con esto se elaboró una guía para el uso del modelo 4D, para que la dirección técnica de PAACUME tenga el conocimiento y el acceso a la información generada.

Esta guía se generó en MS Word, como un paso a paso a seguir mediante imágenes e indicaciones para poder modificar o crear desde las etapas iniciales. Esta guía permitirá modificar o crear, tanto este proyecto de las obras de desvío, como cualquier otro proyecto que se requiera modelar en 4D en Navisworks a partir de un modelo 3D realizado en Civil 3D y una programación de obra realizada en MS Project. La guía se subdividió en secciones de ingreso de datos, modificaciones y obtención de datos de salida, en donde, también se referenciaron mediante links de acceso a los archivos generados en este proyecto.

6. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados y el respectivo análisis de lo realizado en la metodología. Se presenta la estrategia para la excavación y movimiento de tierras. Seguidamente, se tienen los resultados del plan de trabajo. Finalmente, se muestran los requerimientos de obra, en donde se abarca las cantidades y duraciones de la obra. Asimismo, se presentan los modelos y la programación de las obras como una herramienta que logró dar un mejor resultado de los requerimientos de la obra. Así como también, una guía para el uso del modelo 4D.

6.1. Estrategia para la excavación y movimiento de tierras

Debido a que la gran mayoría de los trabajos para el desvío requiere de hacer movimientos de tierra y de materiales sueltos, así como su debida compactación y control, se propuso un método que tuviera en cuenta aspectos geológicos y geotécnicos, y especificaciones técnicas para la construcción de estas obras. También, el diseño óptimo del proceso constructivo en este caso dependió en gran medida del tiempo y de qué tan eficaz se fue en cuanto a los periodos de construcción.

6.1.1. Excavabilidad del terreno y su estrategia

A continuación, se muestra en el Cuadro 2, el resultado de la excavabilidad de las obras de desvío. Se muestra la obra en la que se realizará la excavación, la unidad geomecánica en la que se encuentra, la velocidad de onda sísmica que se determinó. Además, se observa la excavabilidad que se determinó a partir de la comparación expuesta en la metodología. A partir del criterio de que, por debajo de velocidades de onda sísmica de 2000 m/s cualquier material es ripable, se puede ver que, el terreno se logrará excavar mediante una excavadora o un tractor, y que no es necesario utilizar las voladuras en estas obras.

Cuadro 2. Excavabilidad del terreno basado en la velocidad de ondas sísmicas.

Obra de excavación	Código geomecánico	Velocidad de onda sísmica (m/s)	Excavabilidad
Canal de desvío	UG 04 / UG 05	1160 / 1628	Rocas excavables con mototraillas, excavadoras o tractores. No precisan voladura.
Canal temporal	UG 04 / UG 05	1160 / 1628	
Excavación de ataguía	UG 04 / UG 05	1160 / 1628	

En el Cuadro 3, se muestra el método de excavación y movimiento de tierras, en donde primeramente, se tiene la etapa preliminar, en la cual se contemplará el replanteo topográfico preliminar, lo que corresponde a la ubicación de los puntos necesarios para poder trazar los ejes principales de las obras (tanto de los canales como de los diques a construir). Asimismo, se dará la construcción de los caminos de acceso a las obras, escombreras y tajos, para lo cual se deberá realizar la planificación propia para estas obras de acceso. Seguidamente, en la etapa fundamental se da el replanteo definitivo y se inicia con la limpieza y desmonte de la capa vegetal. Esto también contempla las excavaciones principales que se darán por medio de excavadoras hidráulicas, debido a lo determinado por la excavabilidad y el transporte del material

extraído hasta los sitios de almacenamiento. En esta misma etapa se dará el acarreo, vaciado y compactación de material para la conformación de los diques, en esta etapa siempre debe existir un monitoreo y control constante de la correcta ejecución de las obras. Por último, en la etapa final se dará el perfilado y recubrimiento de los taludes en caso de ser necesario, por ejemplo, en la ataguía se tiene la geomembrana y el Rip Rap, estos procesos se darán en esta etapa final. Asimismo, se dará la restauración del medio ambiente y vegetaciones cercanas, en la medida de lo posible, de manera que no afecte la continuación de las obras de la presa principal.

Cuadro 3. Método de excavación, movimiento de tierras y la construcción de las obras de desvío.

Etapa	Definición
Etapa preliminar	Contemplará las actividades de replanteo topográfico preliminar y la construcción de caminos de acceso.
Etapa fundamental	Se presenta el replanteo topográfico definitivo, eliminación de la capa vegetal, excavaciones para la construcción de las obras mediante excavadoras, acarreo de material a las escombreras más cercanas. Acarreo de material desde los tajos definidos para el material de préstamo y vaciado con vagoneta, y compactado de material con un rodillo compactador.
Etapa final	Perfilado de taludes en corte, recubrimiento de taludes y restauración del medio ambiente y vegetaciones cercanas.

El tajo de ignimbritas se definió como la fuente principal de los materiales a utilizar en el desvío del Río Piedras y el desvío del canal de riego, sin embargo, no se definió con detalle para cada obra. Por lo tanto, en el Cuadro 4 se muestran estos materiales propuestos para cada elemento de las obras de desvío. La ignimbrita es una roca ígnea y depositos volcánicos que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos vitreos y pueden estar compuestas de diferentes minerales. (Seggiaro, Gorustovich, & Martí, 1987).

En todos los elementos de desvío, el material a utilizar será ignimbritas, ya sea de gran tamaño o más procesadas (es decir, con una granulometría menor). Además, se determinó, a partir de los datos de los ensayos realizados en diseño de las obras y presentes en la información suministrada por la administración técnica de PAACUME que, estos materiales tienen las propiedades necesarias para ser utilizados en estas obras de desvío. Asimismo, se debe tener claro que el material excavado del sitio de presa también tiene propiedades de ignimbritas, por lo que también puede ser utilizado en estas obras.

En el Cuadro 4 se indica que en el canal auxiliar no existirá ningún tipo de tratamiento superficial. Según O. Quirós, comunicación personal, (2022) el nivel del canal quedará prácticamente al mismo nivel del piso del Río Piedras, por lo que, ahí el material es muy competente. Por ende, este es roca sana o muy poco meteorizada, y por eso no requiere de tratamiento superficial en su base ni en sus taludes (sin embargo, normalmente se realiza un enrocado de protección). Asimismo, el material que se utilizará en el canal temporal de riego será bien seleccionado, y por lo tanto, tendrá las propiedades necesarias a partir de una correcta y debida compactación para poder soportar el paso del agua sin ser desgastado considerablemente. Asimismo, O. Quirós, comunicación personal, (2022) mencionó que, si se llegara a utilizar un tratamiento superficial en caso de ser necesario, únicamente se utilizará una geomembrana lisa para proteger al canal de infiltraciones.

Se propuso la conformación del Rip Rap, el cual será de rocas de gran tamaño extraídas del mismo río o de las voladuras de las laderas del sitio de presa, esto porque, así se ahorrará tiempo y dinero en el transporte de materiales hasta el sitio de colocación. Inicialmente, se había propuesto utilizar las rocas embebidas en concreto, sin embargo, esto representaría un gran desperdicio de recursos, ya que no sería necesario. Esto debido a que, su uso sería únicamente para proteger a la presa del desgaste y erosión del paso del río o la llegada imprevista de alguna crecida, por lo tanto, las rocas únicamente serán colocadas encima de la protección de la geomembrana.

Cuadro 4. Materiales propuestos a utilizar en los elementos del desvío.

Materiales de los elementos de las obras de desvío	
Elemento	Materiales
Canal auxiliar	Excavado y sin revestir (material muy competente)
Canal temporal de riego	Material suelto compactado para los rellenos, el cual es de ignimbritas procesadas seleccionadas, sin revestimiento superficial (con posibilidad de colocar geomembrana HDPE únicamente)
Dique de cierre, preatagüa y contraatagüa	Material de ignimbritas procesadas, primeramente se deberá colocar bolón de roca ignimbrita con tamaños mínimos de 0,6 a 0,8m.
Relleno principal de atagüa	Material para el relleno de presa de ignimbritas procesadas con propiedades competentes.
Protección de geomembrana	Arena fina de ignimbritas procesadas
Rip Rap de atagüa	Bloques de ignimbritas recolectados de voladuras de las laderas del sitio de presa.

Asimismo, cómo parte de la estrategia de excavación y movimiento de tierras, se consideró realizar las alcantarillas y cunetas de escorrentía de agua superficial, en donde se definió que se tendrá una alcantarilla por debajo del canal temporal de riego y otra que atraviese el canal de riego existente. Esto se incluyó en el plan de trabajo a nivel de tiempo y cantidades de material, sin embargo, deberá realizarse un diseño más detallado de evacuación de aguas a nivel geométrico y estructural, lo cual no se incluyó en los alcances del presente proyecto.

6.1.2. Diseño de sitio

A continuación, se presentan los caminos de acceso y ubicación de los tajos de las obras del embalse Río Piedras (Figura 26).

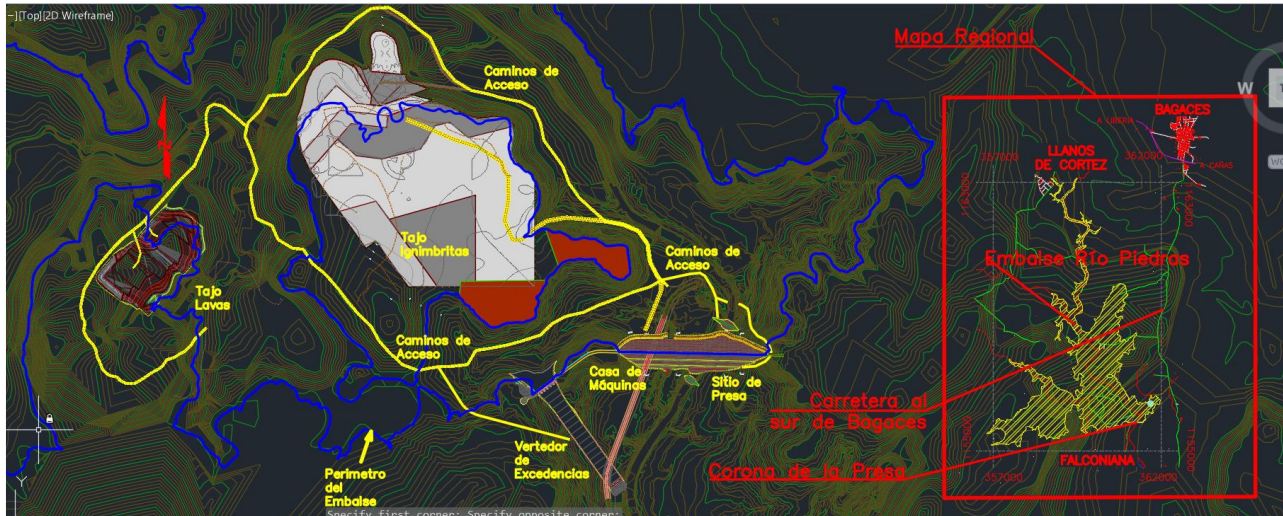


Figura 26. Vista General de Sitios de Extracción y obras para el Embalse Río Piedras.
Fuente. (Artola & Roldán, 2021)

La forma de extracción, acopio de materiales extraídos y producidos en los tajos, y la producción y gestión de esos materiales se definió previamente en el informe de ingeniería del diseño (ICE, 2018). También, los sitios de extracción, las escombreras, y los caminos de acceso de los materiales ya habían sido considerados en este informe, por lo que, no se abarcó cómo parte del presente proyecto. Sin embargo, se propuso una nueva y pequeña escombrera temporal, esto con el fin de poder almacenar ahí el material aprovechable y extraído de las voladuras de las laderas del sitio de presa, y poder aprovecharlo posteriormente en los diques de desvío. Esta escombrera se encuentra al norte del canal temporal y su ubicación es relativamente más cercana a las obras de desvío, en comparación a las otras escombreras.

Asimismo, y de manera más detallada para las obras de desvío, se presenta a continuación, en la Figura 27, el diseño de sitio. En este se puede apreciar la ubicación de la nueva escombrera temporal, la cual tiene un área de aproximadamente 10500 metros cuadrados, en donde se puede apreciar que: por ejemplo, para la excavación de la parte sur del canal de desvío, la escombrera más cercana sería la escombrera 3. Esto se realizó con todas las obras y la escombrera o tajo asociado a ella, según la actividad correspondiente, para así aumentar los rendimientos, debido a que los viajes serán más cortos. Se buscó la manera más eficiente de realizar las obras, mediante la determinación de las menores distancias, y por ende, mayor rendimiento en el transporte de los materiales al disminuir la duración de los viajes.

Tener un sitio de acopio de materiales con importante cercanía a los sitios de excavación es de gran importancia, debido a que, se puede utilizar para almacenar materiales que pueden ser de gran utilidad posteriormente. Asimismo, permite optimizar los periodos de tiempo y permite tener mayor control de los materiales extraídos, ya que, se debe seguir un control de calidad de los materiales extraídos para poder determinar si pueden ser aprovechables. Es por esto que, se propuso realizar la cuarta escombrera temporal, debido a su cercanía al margen derecho del río, además de que no posee un diseño hidráulico ni geotécnico como tal.

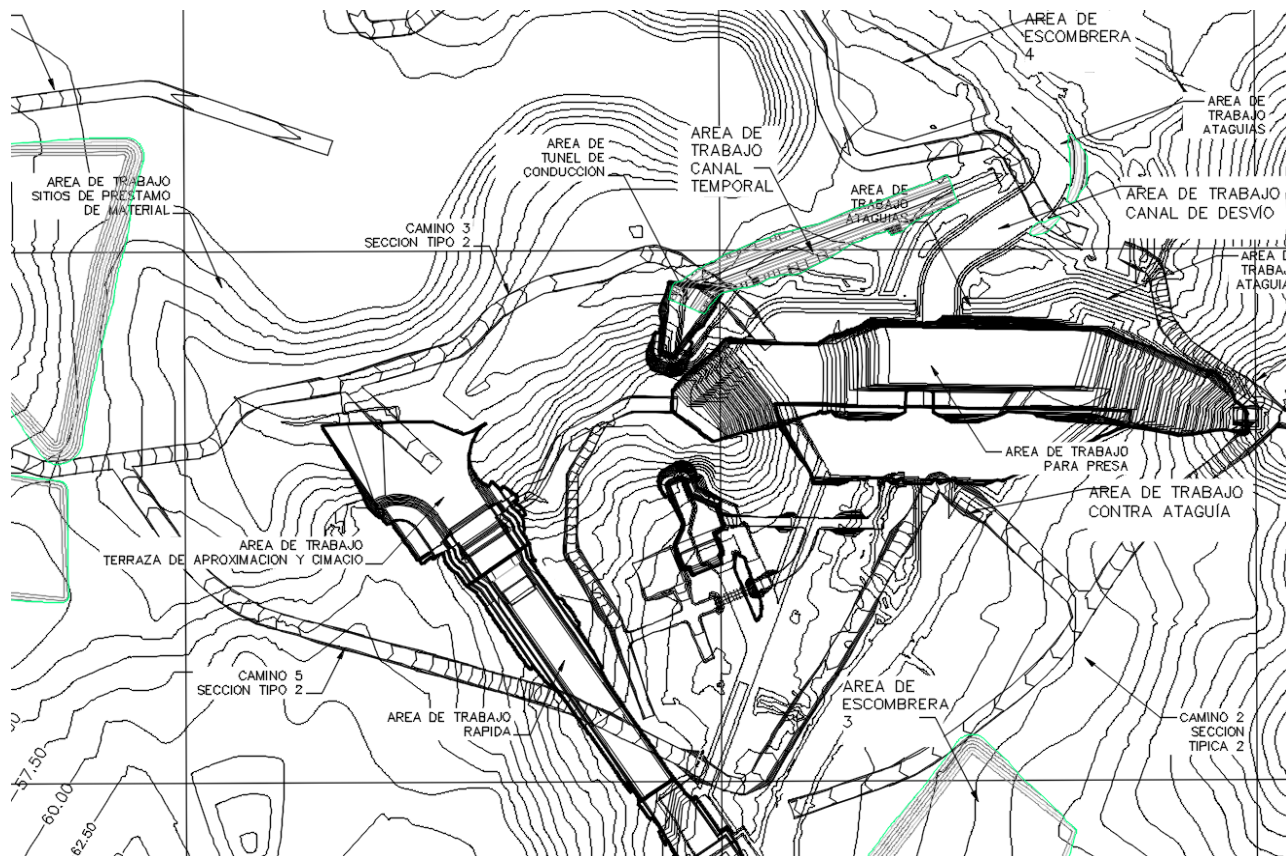


Figura 27. Diseño de sitio de las obras de desvío.
Fuente. Adaptado del plano 1.2.010, (ICE 2018)

6.2. Plan de trabajo de las obras

6.2.1. Actividades y orden de actividades para la ejecución de las obras

La EDT permitió ver con mayor detalle las obras generales de los elementos de desvío, lo que se tomó como base para definir las actividades. A continuación, se muestra la EDT en la Figura 28.

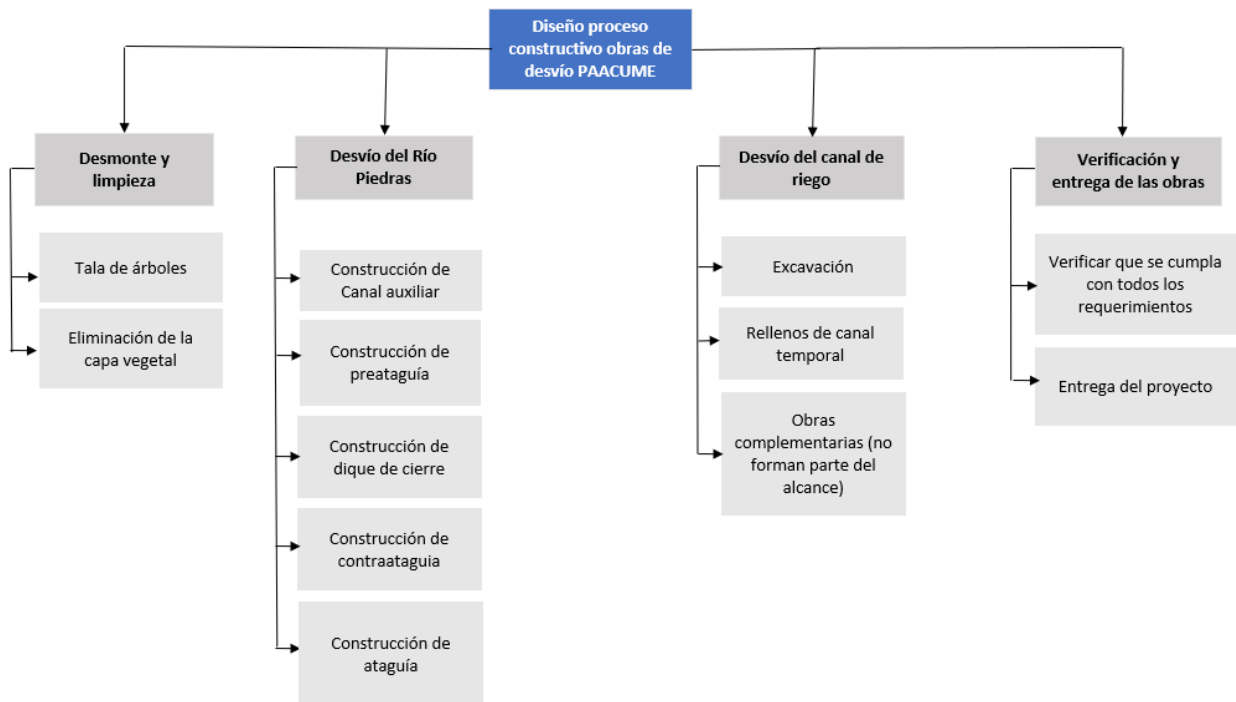


Figura 28. Estructura de desglose de trabajo (EDT) de las obras de desvío.

Se presentan las actividades para la ejecución de las obras de desvío del Río Piedras y desvío del canal de riego, como una lista en el orden respectivo (Cuadro 5). Sin embargo, en la programación de MS Project (ver Apéndice 2) se visualiza con mayor detalle su estructuración.

Cuadro 5. Lista de actividades propuestas para la ejecución de las obras de desvío.

Actividades para las obras de desvío	
1.	Desmonte y limpieza
2.	Excavación del canal auxiliar
	3.1. Excavación del material del canal auxiliar (sin topar con el río)
	3.2. Transporte de material a la escombrera
4.	Construcción de las alcantarillas de desvío (descarga de fondo)
5.	Construcción del túnel de conducción, la toma de aguas, cámara disipadora y canal de conexión
6.	Construcción de atagüa
	6.1. Excavación en las partes secas de la atagüa
	6.1.1. Excavación del material de la atagüa

6.1.2.	Transporte del material a la escombrera
6.2. Rellenos de prueba de las partes excavadas de la ataguía	
6.2.1.	Transporte de material desde el tajo
6.2.2.	Compactado de material
7. Construcción del canal temporal	
7.1.	Excavación de las partes altas del canal temporal
7.2.	Transporte del material a la escombrera
7.3.	Construcción de las alcantarillas y cunetas de drenaje superficial
7.4.	Transporte de material del tajo al canal temporal
7.5.	Compactado del material
8. Continuación de la excavación del canal auxiliar	
8.1.	Excavación del canal auxiliar (topar con el río)
8.2.	Transporte de material a la escombrera
9. Construcción del dique de cierre en el canal auxiliar	
9.1.	Transporte de material desde el tajo
9.2.	Compactado del material
10. Construcción de la preataguía	
10.1.	Transporte de material desde el tajo
10.2.	Compactado del material
11. Construcción de la contraataguía	
11.1.	Transporte de material desde el tajo
11.2.	Compactado del material
12. Continuación de la ataguía	
12.1.	Excavación en el río y demás partes bajas de la ataguía
	12.1.1. Excavación del material de la ataguía
	12.1.2. Transporte del material a la escombrera
12.2.	Rellenos en las partes excavadas de la ataguía
	12.2.1. Transporte de material desde el tajo
	12.2.2. Compactado de material
13. Colocación de la geomembrana y la arena fina y trinchera (Ataguía)	
13.1.	Vaciado de una capa pequeña de arena fina en el talud aguas arriba
13.2.	Colocación de la geomembrana y extendido
13.3.	Relleno de la trinchera con arena fina y compactación
13.4.	Vaciado de otra capa de arena fina por encima de la geomembrana
13.5.	Anclaje de la geomembrana mediante un aluvión en la parte baja
14. Construcción del Rip Rap	
14.1.	Colocación de las rocas de diámetro de 0.6 a 1.2 m máx.

Como se pudo apreciar en el Cuadro 5, se tienen catorce actividades principales, dentro de ellas se desglosan subactividades para poder llevar a cabo las tareas principales. Como primera actividad se planteó la limpieza y el desmonte de la superficie, en donde se darán también los trabajos de replanteo preliminar y la construcción de los caminos de acceso, para lo cual se deberá abarcar con mayor detalle, debido a que, su diseño no contempla parte del alcance de este proyecto. Sin embargo, el diseño de los caminos de acceso si se encuentra en el informe de ingeniería (ICE, 2018). Seguidamente, se propuso realizar la excavación del canal de desvío del Río Piedras. Esta excavación no deberá llegar a topar con el río en ninguno de sus dos extremos en esta primera etapa, ya que, se planteó que primero deberán estar construidas las alcantarillas de desvío, las cuales funcionarán como descarga de fondo de la represa, y que

son por donde correrá el agua del río una vez desviado. Una vez excavada esta parte del canal, se continua con la construcción de las alcantarillas antes mencionadas.

Paralelamente a estas alcantarillas, se propuso construir el túnel de conducción, la toma de aguas, cámara disipadora, y canal de conexión o restitución al canal de riego existente. Paralelamente a estas últimas obras mencionadas, también se propuso iniciar con la excavación y relleno de la ataguía principal en sus partes más altas; es decir, las que no se encuentran en contacto directo con el flujo del río o el canal de riego (más adelante se podrá observar gráfica y aproximadamente estas partes de la ataguía). Esto, debido a que, en ese momento, el flujo deberá estar corriendo con normalidad por donde siempre lo ha hecho. Estos rellenos de las partes más altas funcionarán como rellenos de prueba para comprobar que efectivamente se tiene la resistencia e impermeabilidad deseada. Asimismo, estos servirán para adelantar los trabajos de esta ataguía, la cual es de grandes dimensiones y requiere de un gran periodo de tiempo para su finalización. Se podrá realizar en invierno, debido a que, no se encuentra en contacto con el río, existiendo menor peligro ante una crecida.

Una vez finalizados los rellenos de prueba de la ataguía, se procede con la construcción del canal temporal de riego, esto para que el personal y maquinaria que se encontraba en esas obras, sea el mismo que inicie con el canal temporal. Para el desvío del canal de riego se tiene planeado, por la administración técnica de PAACUME, aumentar el nivel del agua del canal existente. Sin embargo, los muros de cierre del sifón de salida que atraviesa el Río Piedras para este propósito, no se encuentran diseñados hasta el momento, por lo que, la propuesta del desvío de este canal de riego no incluye esta parte, ni el corte del flujo del agua para realizar la conexión con el canal temporal y el sifón de salida. Por lo cual, se requiere que se realicen los ajustes necesarios al momento de incluir esto en el plan de trabajo. Debido a lo anterior, se propuso únicamente realizar las excavaciones y rellenos necesarios del canal temporal de riego hasta llegar a la conexión con la toma de aguas.

La construcción de las alcantarillas y cunetas de drenajes superficiales deberá realizarse dentro de la construcción del canal temporal, luego de realizadas las excavaciones necesarias de esta obra. La construcción de estos rellenos terminaría mucho antes de finalizar el túnel de conducción, por lo que, en ese tiempo de holgura hasta iniciar con la continuación de la excavación del canal auxiliar, o inclusive antes, podrían construirse esos muros de cierre del sifón de salida, ya que esos muros no dependen de ninguna otra estructura y podrían durar un periodo considerable en su construcción. Una vez terminada la construcción del túnel de conducción, se podrá realizar la conexión entre el sifón de salida y el canal temporal de riego, para así desviar el canal de riego existente, lo cual deberá realizarse con materiales bastante competentes debido a que se debe desviar el canal en esta sección y debe soportar el paso del agua.

Seguidamente, y como se observa en el Cuadro 5, se da la continuación y finalización de la excavación del canal de desvío del río. Para este momento, el río comenzará a fluir tanto por las alcantarillas de desvío como por su cauce original, debido a que, el canal se encontrará casi al mismo nivel del piso del río, por lo que siempre existirá flujo, y por ende, teóricamente se cumplirá con el caudal ecológico. En todo momento del desvío del río, deberá haber control de ese caudal ecológico, y la ejecución de un plan de acción para el rescate de la fauna del río, para lo cual también deberá realizarse su propia planificación. Luego, se propuso, que se deberá iniciar con la construcción del relleno y compactación del dique de cierre del canal de desvío del río, esto para que el agua no se desborde del mismo. Luego de esto, se construirán paralelamente la preataguía y la contraataguía, con el material suelto y compactado, provenientes del tajo ignimbritas, donde también se utilizará bolón que se extraerá de las voladuras de las laderas de la presa principal, para cerrar el flujo del agua y poder desviarlo.

Finalmente, una vez realizado el desvío de ambos flujos de agua, se continuará con la construcción de la ataguía en las partes más bajas, realizando el relleno y compactación debida, hasta topar con los otros rellenos que se encontraban realizados. Como parte de la etapa final, se propuso realizar la instalación de la geomembrana HDPE, con su respectiva trinchera y capa de protección de arena fina, y también el Rip

Rap de protección que tendrá el mismo bolón extraído de las laderas de la presa o extraído del tajo de ignimbritas.

Por otra parte, es de gran importancia considerar que, dentro de cada actividad de vaciado y compactado, se deben realizar las pruebas de compactación necesarias. Se deberán hacer también pruebas de calidad en el sitio de las canteras, en la colocación y en el proceso de compactación. De acuerdo con las recomendaciones obtenidas, se determinó que se deben realizar pruebas con el densímetro nuclear, debido a que, estas permitirán conocer la compactación necesaria y la humedad óptima. En caso de que se tenga mucha humedad en el material, este deberá dejarse expuesto para que pierda humedad, y en caso contrario, deberá humedecerse con un camión cisterna luego de su extendido.

Se muestra y se analiza el orden de las actividades definidas anteriormente. A continuación, en el Cuadro 6, se muestran las precedencias determinadas mediante el procedimiento expuesto. En la Figura 29, se muestra el diagrama de Gantt, que se obtuvo mediante la programación de las obras. En este, se puede apreciar de mejor forma la secuencia de las actividades. No obstante, en el Apéndice 2, se ve con mayor detalle.

Cuadro 6. Definición de las predecesoras de cada actividad.

Predecesoras de las actividades	
Actividad	Predecesoras
1. Inicio del proyecto	-
2.Desmante y limpieza	1
3.Excavación del canal de desvío	2CC+1sem
4.Construcción de alcantarillas	3
5.Construcción del tunel de conducción, toma de aguas, cámara disipadora y canal de conexión	4CC
6.Construcción de ataguía	5CC
7.Construcción del canal temporal	6
8.Continuación del canal de desvío	4
9.Construcción del dique de cierre	8
10.Construcción de pre ataguía	8;9
11.Construcción de contraataguía	10CC
12.Continuación de la ataguía	9;10;11
13.Colocación de geomembrana, arena fina y trinchera	12
14.Construcción del Rip Rap	13
15. Fin del proyecto	14

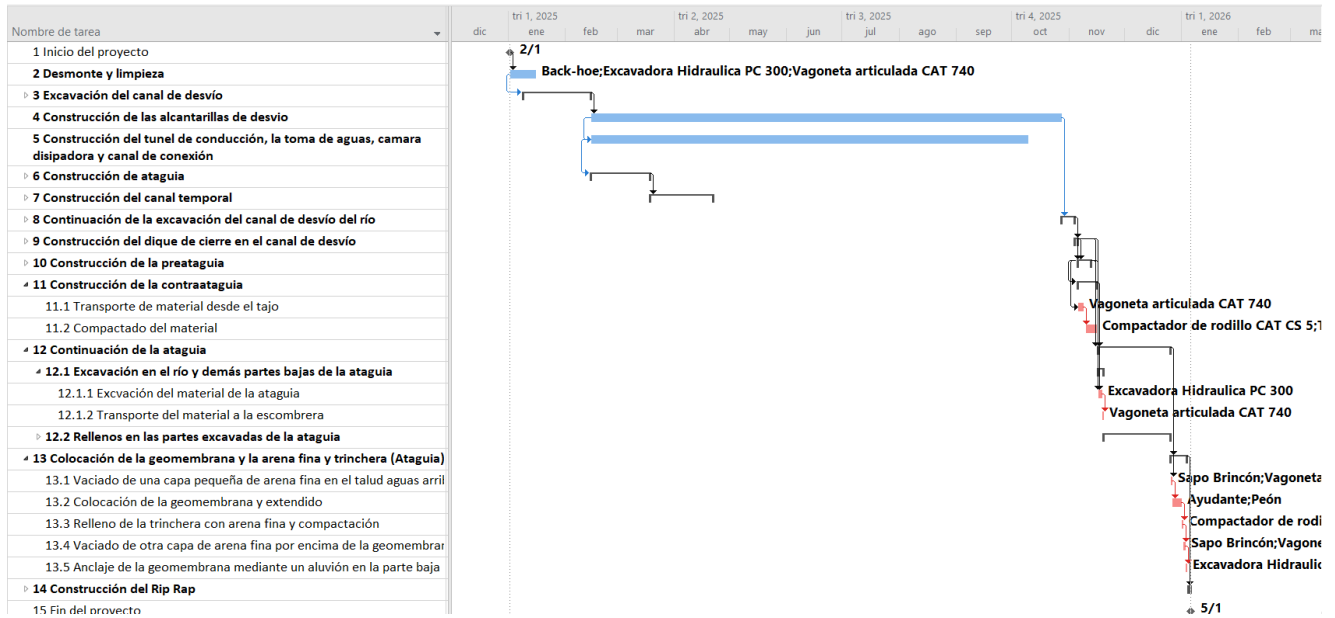


Figura 29. Diagrama de Gantt de la programación de las obras.

A partir de lo expuesto en el Cuadro 6, y como se vio en la Figura 29, se propuso entonces que, se iniciará con el desmonte y la limpieza del terreno. Una semana después cuando esta tarea ya haya avanzado, se iniciará con la excavación del canal auxiliar, la cual topará con la construcción de las alcantarillas, más no se topará con el río, debido a que el agua no podrá ingresar aún a las alcantarillas. Una vez terminada esta etapa de excavación del canal auxiliar, se seguirá con la construcción de las alcantarillas de desvío y el túnel de conducción y sus obras asociadas, para que, paralelamente, también se inicie con la construcción de los rellenos de prueba de la ataguía (estos rellenos se pueden ver gráfica y aproximadamente más adelante).

Finalizados los rellenos de prueba de la ataguía, se iniciará con la construcción de canal temporal de riego, en donde, se incluirá la construcción de las alcantarillas de drenaje superficial. Una vez finalizado el canal temporal de riego, se tendrá un tiempo de holgura hasta que se termine con la construcción de las alcantarillas de desvío, que posteriormente funcionarán como descarga de fondo del embalse. Luego de esto, se podrá finalizar con la excavación del canal auxiliar, en donde el río comenzará a fluir por las alcantarillas. El dique de cierre se iniciará luego de esto. Para la construcción de la preataguía, y por ende, el desvío definitivo del río, debe estar terminado el dique de cierre y la excavación del canal auxiliar. Paralelamente, se iniciará la contrataguía, que evitará que el agua se devuelva por su cauce natural. La construcción del túnel de conducción y sus obras asociadas, se espera que terminen en pocos días antes de iniciar con la construcción de las demás partes de la ataguía. Por tanto, es ese momento en que se puede realizar el corte del servicio de riego, y por ende, el desvío del canal de riego.

Una vez finalizado todo lo anterior, se procederá a realizar la excavación y rellenos de las partes más bajas de la ataguía, y por ende su finalización. Seguidamente, se iniciará con la colocación de la geomembrana y sus anclajes, para que, finalmente se pueda realizar la construcción del Rip Rap de protección de la ataguía principal, en su cara aguas arriba. Del mismo modo que se realizó la definición de las actividades, fue definido el orden de cada una de ellas, siendo el orden ya mencionado, la mejor propuesta para poder realizar las obras en el tiempo estimado y respetando las dependencias de cada actividad para iniciar la siguiente.

Además de la secuencia de las actividades, el diagrama de Gantt permitió ver la ruta crítica del proyecto. Se pudo apreciar en la Figura 29 que, la ruta crítica comenzó a partir de la construcción de la contraataguía y hasta la finalización de las obras de desvío. Lo cual indica que, durante todo ese lapso se deberán

realizar las obras lo más apegado posible a la programación, tratando de evitar cualquier tipo de atrasos o reprocesos, ya que esto provocaría que se den atrasos en la totalidad del proyecto PAACUME. Con el fin de que este riesgo se minimice, se deberá tener constante coordinación de todas las áreas del proyecto, lo que permitirá que, posiblemente, se adelanten las obras que están primero que las que se encuentran en la ruta crítica. Esto permitiría que se dé una fecha de inicio antes de lo planeado, y por ende, se tenga un tiempo de seguridad que permita corregir cualquier tipo de error a tiempo, y así no provocar atrasos en las fechas de entrega. También se deberá hacer un correcto seguimiento de la estrategia de acarreo de materiales que se propuso en la sección 6.2.2 para evitar atrasos en la disponibilidad del material en el sitio de obra.

6.2.2. Logística de acarreo de materiales

Las únicas obras que requieren de excavación de materiales son el canal auxiliar, el canal temporal de riego y la ataguía principal. Por lo tanto, son estas las que requerirán de acarrear material excavado hasta las escombreras. Las demás obras requerirán, por el contrario, del acarreo de material desde el tajo de ignimbritas, o del acarreo del material aprovechable que se almacenará temporalmente en la escombrera 4, para realizar los rellenos correspondientes.

Se determinaron las distancias entre un sitio de obra y las escombreras o tajos, y se propuso que se llevara el material extraído a las escombreras más cercanas para poder disminuir las distancias, y por lo tanto, los tiempos de cada viaje. Asimismo, los frentes de trabajo que se propusieron en la sección 6.2.3. optimizarán la llegada y salida de cada viaje de las vagonetas que transportan el material. Por lo que, llevar el material a otras escombreras más lejanas, únicamente sería debido a que se alcance la capacidad máxima de la escombrera y se requiera de otra, o bien, que se deshabilite su uso por alguna razón; lo que causaría atrasos y un incremento en los costos. Estas distancias se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Distancias de las rutas de acarreo del material.

Distancias a tajos y escombreras								
Punto 1	Punto 2	Distancia	Unidades	Punto 1	Punto 2	Distancia	Unidades	
Tajo ignimbritas	Ataguía	1850	m	Tajo ignimbritas	Contraataguía	2000	m	
Tajo lavas		1100	m	Tajo lavas		1500	m	
Escombrera 1		1400	m	Escombrera 4		980	m	
Escombrera 2		700	m	Escombrera 1	Voladuras	1900	m	
Escombrera 3		1000	m	Escombrera 2		350	m	
Escombrera 4		460	m	Escombrera 3		1450	m	
Tajo ignimbritas		1650	m	Escombrera 4		500	m	
Tajo lavas	Canal temporal	750	m	Escombrera 1	Canal auxiliar	1400	m	
Escombrera 1		1300	m	Escombrera 2		900	m	
Escombrera 2		900	m	Escombrera 3		1200	m	
Escombrera 3		700	m	Escombrera 4		350	m	
Escombrera 4		140	m					
Tajo ignimbritas		Preataguía y dique	2000	m				
Tajo lavas			900	m				
Escombrera 4	280		m					

A continuación, en el Cuadro 8, se muestran los resultados obtenidos del análisis de rutas. Se presenta la cantidad de viajes por hora y los rendimientos obtenidos para cada ruta. Como se puede observar, se consideró un abultamiento del 20% del volumen del material como ya se mencionó.

Cuadro 8. Viajes por hora y rendimientos obtenidos para las rutas del acarreo con vagoneta articulada CAT 740.

Rendimientos vagoneta articulada CAT 740				
Velocidad máxima de vagoneta		15 km/h		
Capacidad de vagoneta		18,4 m³		*20% abultamiento
Punto 1	Punto 2	Duración de un viaje (h)	Viajes / h	Rendimiento (m³/h)
Ataguía	Tajo ignimbritas	0,25	4	75
	Tajo lavas	0,15	7	125
	Escombrera 1	0,19	5	99
	Escombrera 2	0,09	11	197
	Escombrera 3	0,13	8	138
	Escombrera 4	0,06	16	300
Canal temporal	Tajo ignimbritas	0,22	5	84
	Tajo lavas	0,10	10	184
	Escombrera 1	0,17	6	106
	Escombrera 2	0,12	8	153
	Escombrera 3	0,09	11	197
	Escombrera 4	0,02	54	986
Preataguía y dique	Tajo ignimbritas	0,27	4	69
	Tajo lavas	0,12	8	153
	Escombrera 4	0,04	27	493
Contraataguía	Tajo ignimbritas	0,27	4	69
	Tajo lavas	0,20	5	92
	Escombrera 4	0,13	8	141
Voladuras	Escombrera 1	0,25	4	73
	Escombrera 2	0,05	21	394
	Escombrera 3	0,19	5	95
	Escombrera 4	0,07	15	276
Canal de desvío	Escombrera 1	0,19	5	99
	Escombrera 2	0,12	8	153
	Escombrera 3	0,16	6	115
	Escombrera 4	0,05	21	394

A continuación, se muestran en el Cuadro 9, las rutas determinadas para el acarreo del material excavado, desde las obras hasta la escombrera correspondiente. Estas fueron las rutas que presentaron mayor rendimiento, debido a que fueron las que presentaron menores distancias. Por ende, fueron las seleccionadas para el acarreo del material excavado.

Cuadro 9. Rutas y rendimientos determinados para el acarreo del material excavado.

Rutas y rendimientos para el acarreo de material excavado			
Punto 1	Punto 2	Viajes / h	Rendimiento (m ³ /h)
Canal auxiliar	Escombrera 2	8	153
Ataguía principal		11	197
Canal temporal	Escombrera 3	11	197

Se presenta la logística de materiales como una lista de acatamientos y criterios a tomar en cuenta a la hora de ejecutar las actividades. Esto se determinó a partir del análisis del método de excavación y movimiento de tierras propuesto.

- Los materiales de los diques (preataguía, dique, contraataguía, canal temporal y ataguía) se extraerán del tajo de ignimbritas, siempre y cuando los materiales extraídos de las excavaciones de las laderas del sitio de presa y de la excavación de la ataguía no tengan las propiedades necesarias (material sedimentario, fluvial inconsolidado) o no sea la cantidad suficiente para utilizarlos en dichas obras.
- El material extraído de la excavación del canal auxiliar y de la excavación de la ataguía principal se llevará hasta la escombrera 2.
- El material extraído de la excavación del canal temporal se llevará hasta la escombrera 3.
- La escombrera 4, la cual se propuso en el presente documento, será únicamente una escombrera temporal que permitirá almacenar en un lugar más cercano a las obras de desvío el material excavado y aprovechable, por lo que debe ser retirado posteriormente cuando se utilice como material de relleno.
- El material en las escombreras deberá acomodarse tal y como se indicó en el informe de ingeniería, y en donde el material más competente se almacena en la parte más baja para tener mayor acceso y soporte del relleno.
- Para la construcción de los rellenos del dique de cierre, la preataguía, la contraataguía y el canal temporal, se deberá iniciar con la colocación de material "bolón", es decir, rocas de gran tamaño (diámetro de 0,6 m a 1,2 m máximo) para poder detener el paso del agua y que este no lave el material, y seguidamente se podrá colocar material de menor tamaño hasta llegar a un material granular fino que pueda ser compactado y de esta manera cerrar el flujo del agua y darle las propiedades geométricas necesarias a las estructuras.
- Durante la extracción de materiales en los tajos, en la colocación y en el proceso de compactación deberán realizarse inspecciones de la calidad de los materiales y su correcta consolidación.
- La construcción de los rellenos de la ataguía en las partes altas se debe aprovechar al máximo para realizar las pruebas correspondientes, y así utilizarlos como rellenos de prueba, y comprobar que tanto el material como el proceso es el adecuado.
- En los taludes de las excavaciones del canal de desvío hacia las alcantarillas y saliendo de estas no se requiere de ninguna estabilización debido a que quedará en el piso del río y, por ende, el material será un material competente resistente a la erosión provocada por el paso del agua del río.

- Los taludes de la excavación de la ataguía tampoco necesitan ser estabilizados, debido a que el material es competente y los taludes tienen baja pendiente.
- La preataguía es un dique temporal para el desvío del río y debido a esto, no requiere de un diseño muy complejo, por lo que es muy probable que el agua siga filtrándose después de construida la preataguía hacia aguas abajo del cauce principal del río, al espacio entre la preataguía y la ataguía principal, por esto se debe tener en cuenta un manejo del agua para que el agua que se filtre vaya a la parte más baja y a partir de ahí utilizar bombas de agua para llevarla nuevamente hacia las alcantarillas de desvío mientras se construye la ataguía principal.
- Se debe considerar realizar adecuadamente el anclaje de la geomembrana, tanto en la parte superior como en la parte inferior del talud de la ataguía, esto para que el agua no se filtre y no lave el material fino del relleno, ya que si no habría problemas con las filtraciones hacia la excavación del sitio de presa.
- La geomembrana de HDPE debe tener una protección de arena fina en ambas caras, para evitar que se rompa ante la acción de materiales granulares más gruesos como el Rip Rap.
- Considerando que en el informe de ingeniería se mencionó que los materiales del proyecto PAACUME presentarían deformaciones a considerar producto del acomodo y rotura de las partículas durante el proceso de construcción y operación de la presa, y que a pesar de esto se consideran adecuados para ser utilizados en los enrocados de la presa, se debe realizar una adecuada compactación, seguida de un adecuado control del proceso, y las medidas oportunas necesarias.

Esta logística del manejo de materiales se definió de esta manera debido a que, primeramente, se realizó la estrategia más adecuada para darle el mejor uso a los materiales disponibles en el proyecto y por lo tanto aprovechar los materiales disponibles en el sitio, así como su gestión y acarreo, y así hacer uso eficiente de los recursos que se tienen y no depender de materiales que se deban transportar de lugares más lejanos y por ende se incrementen los costos y duraciones de las obras. Con esto se definió de manera eficiente los espacios de obtención y almacenamiento de materiales.

6.2.3. Cuadrillas de trabajo

A continuación, se muestra la cantidad de personal determinada, la cual, como se menciona en la metodología, en su mayoría son los operarios encargados de manejar la maquinaria pesada que se necesita en las obras. Por lo tanto, se puede apreciar también, la maquinaria que se propuso para la ejecución de cada obra. Esto se abarcó con mayor detalle en la sección 6.2.4. La conformación de cuadrillas expuestas en el Cuadro 10, se determinó luego de realizar las variaciones expuestas en la metodología. Además, en el Cuadro 11, se muestran las cuadrillas de trabajo para el desmonte y la limpieza, así como la cuadrilla típica de apoyo a las obras que se mencionó.

Cuadro 10. Mano de obra para las obras de desvío.

Rellenos y excavaciones de obras de desvío		
Estructura	Personal	Cantidad base por Actividad
Canal auxiliar	Operario Excavadora Hidráulica PC 300	3
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	6
Ataguía principal	Operario Tractor de Oruga (D6)	2
	Operario Excavadora Hidráulica PC 300	3
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	6
	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	2
Canal temporal	Operario Tractor de Oruga (D6)	2
	Operario Excavadora Hidráulica PC 300	3
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	6
	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	2
	Operario Back-Hoe	1
	Ayudante	26
	Peón	25
Dique de cierre	Operario Tractor de Oruga (D6)	1
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	1
	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	1
Preataguía	Operario Tractor de Oruga (D6)	1
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	1
	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	1
Contraataguía	Operario Tractor de Oruga (D6)	1
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	1
	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	1
Trinchera y Rip Rap (Ataguía)	Operario Tractor de Oruga (D6)	1
	Operario Excavadora Hidráulica PC 300	3
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	6
	Operario Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	1
	Operario sapo brincón	1

Cuadro 11. Mano de obra de limpieza y cuadrilla típica que apoyará el trabajo de la obra.

Limpieza, pisajismo y cuadrilla típica de obras de desvío		
Estructura	Personal	Cantidad base por Actividad
Desmonte y limpieza	Operario Back-Hoe	5
	Operario Excavadora Hidráulica PC 300	2
	Operario Vagoneta Articulada CAT 740	2
Vegetación	Peón	1
Obras de desvío (General)	Coordinador de obra civil	1
	Encargado de maquinaria pesada	1
	Peón	2
	Inspector de costos	1
	Auxiliar de maquinaria	1

En la siguiente lista se mencionan los acatamientos y criterios a tomar en cuenta a la hora de coordinar y contratar las cuadrillas de trabajo, así como algunas otras consideraciones a nivel general de la ejecución de las obras:

- La cantidad base de personal propuesta en el Cuadro 10, es la cantidad de frentes de trabajo para cada actividad, y esto deberá coordinarse entre obra y obra, dependiendo de las posibilidades del contratista.
- Se deberá contar con una cuadrilla típica de apoyo a las obras, que sea la encargada de administrar y verificar los procesos constructivos propuestos en el presente proyecto, dentro de la cual se deberá tener, como mínimo, un coordinador de la obra civil, encargado de maquinaria pesada, un peón, un inspector de costos, y un auxiliar de maquinaria.
- Respetar los horarios y jornadas de trabajo, así como administrar de forma eficiente el trabajo de los trabajadores para evitar los tiempos muertos y el trabajo no productivo o contributivo, para, de esta manera, optimizar los rendimientos y los periodos de trabajo planeados.
- Será responsabilidad del contratista, velar por las jornadas de trabajo y hacer respetar las pautas estipuladas por el ministerio de trabajo.
- La instalación de la geomembrana HDPE podrá realizarse por medio de un subcontrato, sin embargo, deberán realizarse pruebas para verificar el certificado de garantía y calidad de esta.
- En el desvío del río deberá darse, en todo momento, una verificación del caudal ecológico, así como que será necesario ejecutar un plan de acción para el rescate de la fauna.
- Es importante tener en cuenta que el acceso a muchos servicios, combustible, repuestos, o cualquier suministro necesario, se encuentra a una distancia y tiempo considerable del lugar de las obras. Por lo tanto, es importante que la administración esté pendiente de cualquier tipo de recurso necesario para que lo puedan tener disponible cuando se requiera, y de esta forma, evitar realizar viajes de emergencia o innecesarios hasta Bagaces o Liberia.
- Se debe tener muy en cuenta los aspectos relacionados a los permisos ambientales y de construcción, y tenerlos activos al momento de la construcción de los desvíos ya que esto podría generar muchos atrasos al estar en la ruta crítica

Asimismo, se realizaron diversas estimaciones en la hoja de cálculo generada en MS Excel, en donde se vio que, si se realiza un incremento en el personal y maquinaria a utilizar, las duraciones (las cuales se presentan en el siguiente capítulo) serían menores. A modo de ejemplo, si se realiza un incremento del

doble de lo definido para la cuadrilla del desmonte y la limpieza, la duración pasaría a ser casi la mitad de lo que se determinó originalmente. Sin embargo, y a pesar de que los tiempos serían menores, se tomó en cuenta el espacio disponible. Esto debido a que, si se coloca demasiado personal podría haber un colapso entre la coordinación de cada operario con los demás, además de que el espacio podría no ser suficiente.

Sin embargo, se determinó que, el personal propuesto trabajará adecuadamente en el espacio con sus demás compañeros. A modo de ejemplo, se tiene la excavadora hidráulica, la cual debe trabajar mediante un radio de giro adecuado y no cruzarse con otra excavadora que trabaje al lado. De manera más específica y como ejemplo, se tiene el canal auxiliar en su parte de entrada a la descarga de fondo, el cual tiene una longitud de aproximadamente 200 metros. Como se vio en el Cuadro 10, se definieron 3 excavadoras hidráulicas para esta obra. Esto indica que, cada operario de las excavadoras tendrá un espacio de aproximadamente 67 metros para realizar sus trabajos correspondientes. Como se observa, es una propuesta de cuadrillas adecuada, sin embargo, si se quisiera adelantar más rápidamente los trabajos, se podría valorar otro escenario con mayor cantidad de personal. Para lo cual, se deberá tomar en cuenta el espacio disponible, así como el incremento en los costos que esto podría provocar.

Además, se tomó en cuenta el tiempo a nivel macro de las obras de desvío definido por la administración técnica de PAACUME y se determinó que las cuadrillas propuestas terminarían las obras en ese tiempo, sin embargo, esto podría modificarse a criterio del contratista y sus posibilidades de contratación y administración de personal, siempre y cuando se respeten las cantidades a excavar o rellenar y se realice en el tiempo estimado o antes.

6.2.4. Requerimientos de equipo y maquinaria

En el Cuadro 12 se muestra el equipo y maquinaria definida para el proyecto, a pesar de que se pudo apreciar anteriormente en el Cuadro 10. Aquí se observan las tareas que puede ejecutar cada maquinaria, así como el rendimiento de cada una, para lo cual, se consideró tiempos muertos o no productivos.

La maquinaria propuesta fue utilizada en el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís, y también fue propuesta para la construcción del sitio de presa en este mismo proyecto PAACUME, esto debido a que es maquinaria apta para las tareas a realizar y considera rendimientos buenos y altamente productivos.

Cuadro 12. Definición de equipo y maquinaria, las tareas a ejecutar y su rendimiento.

Equipo y maquinaria	Tareas a ejecutar	Rendimiento
Tractor de Oruga (D6)	Extender y acomodar material	84 m ³ /h
Vagoneta Articulada CAT 740	Acarrear y vaciar material	**
Compactador de Rodillo (CAT CS-5, 10 TON)	Compactar	65 m ³ /h
Back-Hoe	Excavar, rellenar y definir taludes	20 m ³ /h
Sapo Brincón	Compactar	190 m ² /h
Excavadora Hidráulica PC 300	Excavar, rellenar, definir taludes y cargar material	82 m ³ /h

En la siguiente lista se mencionan los acatamientos y criterios a tomar en cuenta a la hora de adquirir y utilizar la maquinaria o equipo:

- La maquinaria propuesta puede variarse, siempre y cuando, se verifiquen los rendimientos para que no sean menores a los propuestos, o que los frentes de trabajo sean los necesarios para compensarlo.
- La maquinaria y el equipo deberán tener revisión periódica y un adecuado mantenimiento, como el engrase de sus partes mecánicas movibles, que eviten al máximo los atrasos en la reparación de estos.
- La maquinaria deberá ser utilizada única y exclusivamente para las tareas definidas, teniendo el mayor cuidado posible para evitar cualquier accidente o daño a la misma.
- Si el contratista cuenta con otra maquinaria, pero tiene las características necesarias para ser utilizada en las obras, lo puede hacer.
- La maquinaria deberá estar en perfectas condiciones de modo que funcione correctamente y así evitar pérdidas de material o atrasos por el funcionamiento inadecuado de esta.

6.2.5. Riesgos y limitaciones

Se presenta a continuación, una lista de riesgos y limitaciones que se pueden presentar en el desarrollo de las obras de desvío, las cuales abarcan desde la etapa de planificación, hasta la ejecución y puesta en operación.

- Existe el riesgo de que el río se crezca mucho, y por ende, comience a lavar materiales sueltos de la preatagüa u obras similares. Por lo tanto, deben controlarse estas estructuras periódicamente, dándoles un correcto mantenimiento.
- Hay riesgo de que la atagüa, en sus partes que cierran el río o partes más bajas, se construya en invierno, por lo que, se debe de tener control de las crecidas en el río para evitar cualquier tipo de accidente.
- Se tiene actualmente, la limitación de que, los muros de cierre del sifón de salida no están diseñados, y por ende representan un atraso en la planificación.
- El desvío del canal de riego está limitado a un paro de operación de máximo una semana, debido a que, los usuarios necesitan el agua para utilizarla en sus debidas actividades.
- Los desvíos de ambos afluentes están limitados a que otras obras, como el túnel de conducción y las alcantarillas de desvío del río, estén finalizadas.
- Es importante que se tenga un buen manejo de los tajos, y que las extracciones de material se vayan dando conforme se necesite el mismo, para así evitar atrasos por esperas de material o extracción de este.
- Existe un riesgo de que, la escombrera temporal propuesta no tenga suficiente salida de material y que este se acumule mucho, lo que podría generar un apesamiento de las aguas del río. Esto debido a que, la escombrera temporal se encuentra muy cerca al margen derecho del río, y el sitio de la escombrera es bastante plano; por lo que, debe efectuarse un manejo adecuado de los materiales para no apilarlos muy cerca del cauce del río.

Se debe considerar también, cualquier riesgo de trabajo o riesgo derivado de la ejecución de otras obras importantes del proyecto y que tengan relación directa o indirecta con las obras de desvío.

6.3. Cuantificación de los requerimientos de obra

Específicamente, se utilizó un modelo 4D para el cálculo de estos requerimientos, este modelo consiste en integrar los objetos 3D con las tareas de la planificación de la programación de los trabajos de la obra. “Un modelo 3D consiste en utilizar software para crear una representación matemática de un objeto o forma tridimensional. El objeto creado se denomina modelo 3D” AUTODESK (2022).

6.3.1. Cantidades de los trabajos

El modelo 3D que se desarrolló en esta sección contiene los elementos necesarios para el desvío del río y el canal de riego, dentro de los cuales se encuentra el canal de desvío del río Piedras (canal auxiliar), el canal temporal de riego, la preatagüa, el dique de cierre, la contraatagüa, la atagüa principal y la excavación de esta última, entre otros elementos gráficos y no gráficos; como lo es la toma de aguas, que optimiza el modelo y el nivel de detalle de este. A continuación, se presenta el modelo de civil en 2D (Figura 30), debido a que, en esta dimensión es como se modelan estas obras en Civil 3D. Asimismo, se presenta en 3D (Figura 31), en formato conceptual.

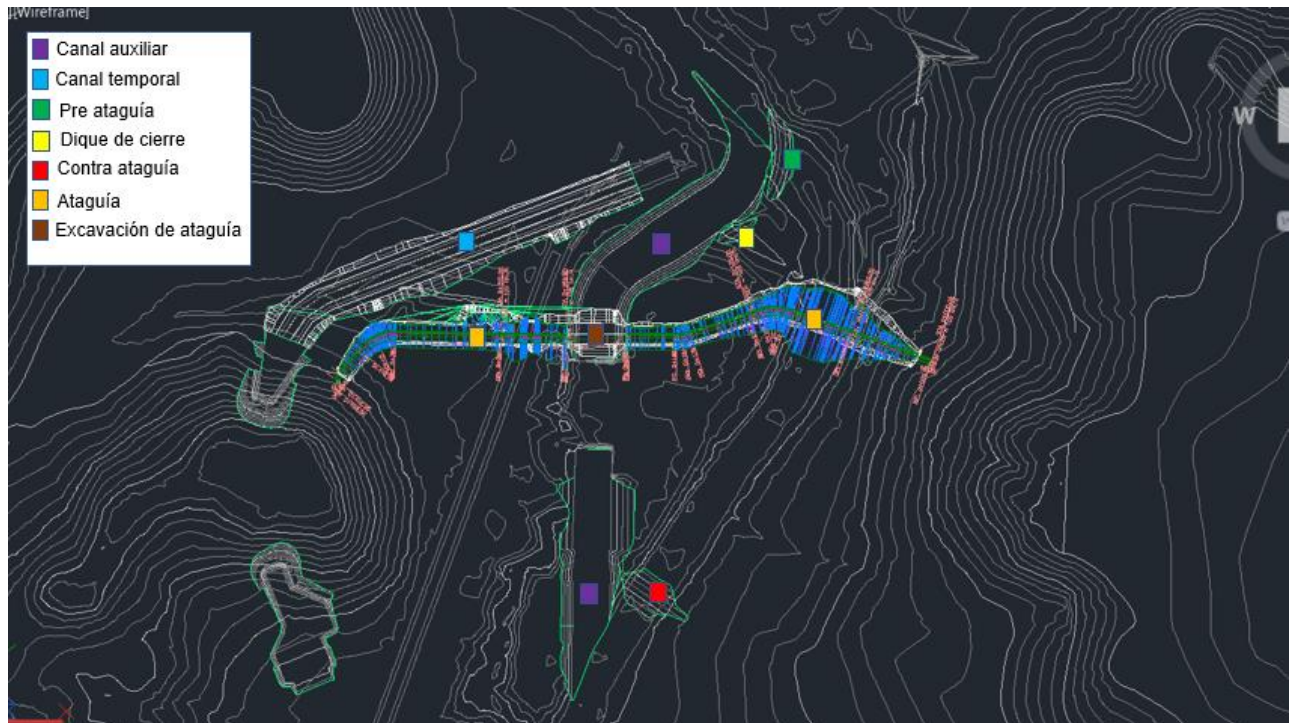


Figura 30. Modelo en 2D de las obras de desvío en civil 3D.

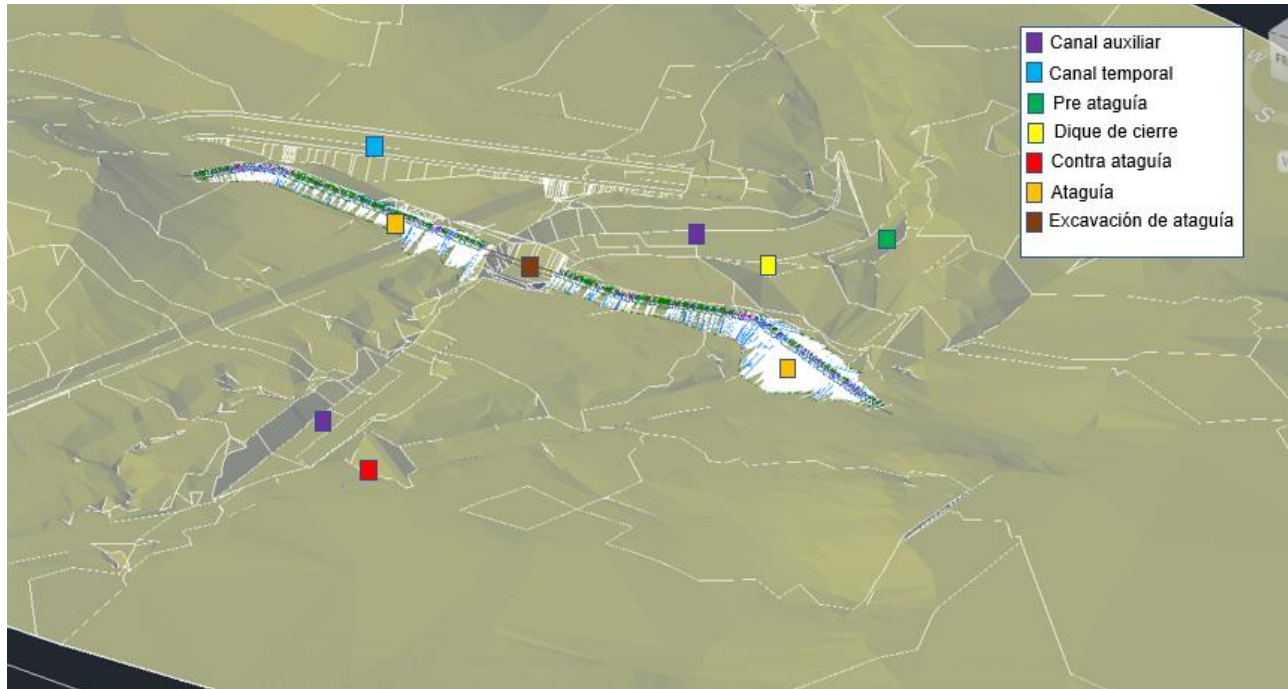


Figura 31. Modelo conceptual en 3D de las obras de desvío en civil 3D.

A continuación, se muestra a nivel gráfico el modelo 4D. La Figura 32 presenta el detalle de la ataguía, la cual fue realizada en el modelo 3D con ayuda de la herramienta “Subassembly Composer”, y posteriormente cargada en el modelo 4D.

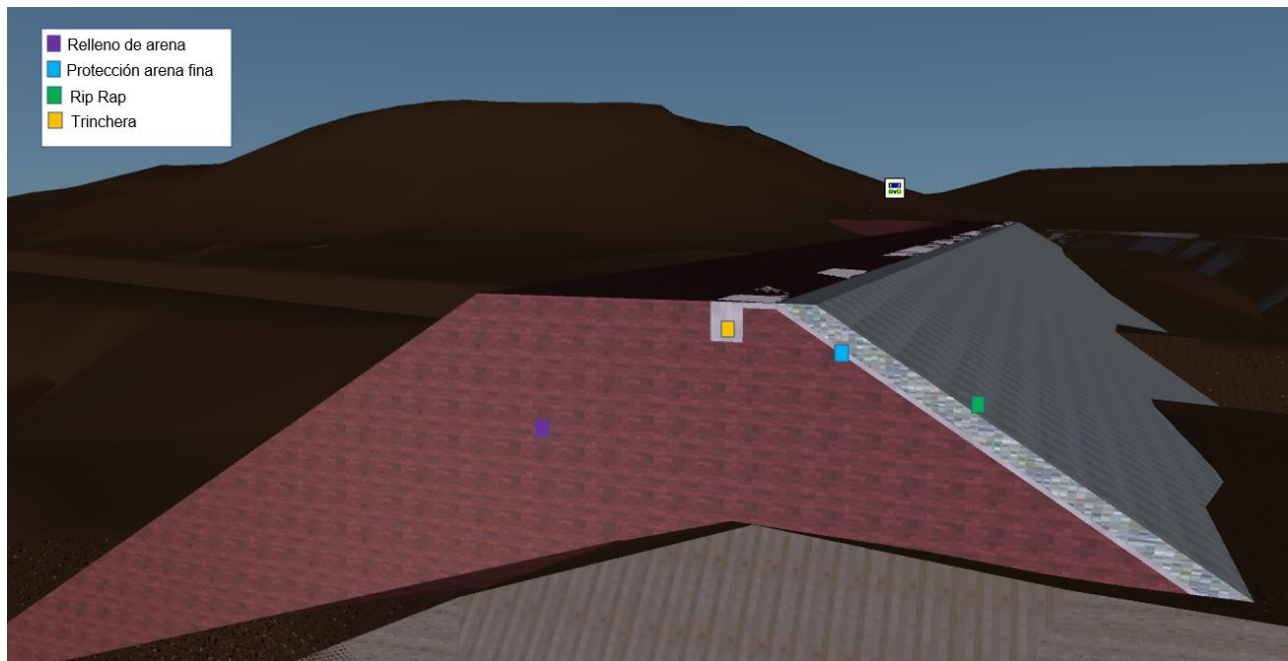


Figura 32. Visualización de la ataguía principal en corte transversal.

Asimismo, el modelo permitió tener visualizaciones de renders adaptados a la realidad, los cuales requieren de una gran capacidad computacional para visualizarlos de mejor manera. En la Figura 33 se puede

apreciar un render realizado a modo de ejemplo de visualización, desde la parte de la preatagüa hacia aguas abajo del río. De la misma manera y de una forma menos renderizada, se pueden apreciar las obras en 3D con un nivel gráfico conceptual, tal y como se muestra en las Figuras 34 y 35.

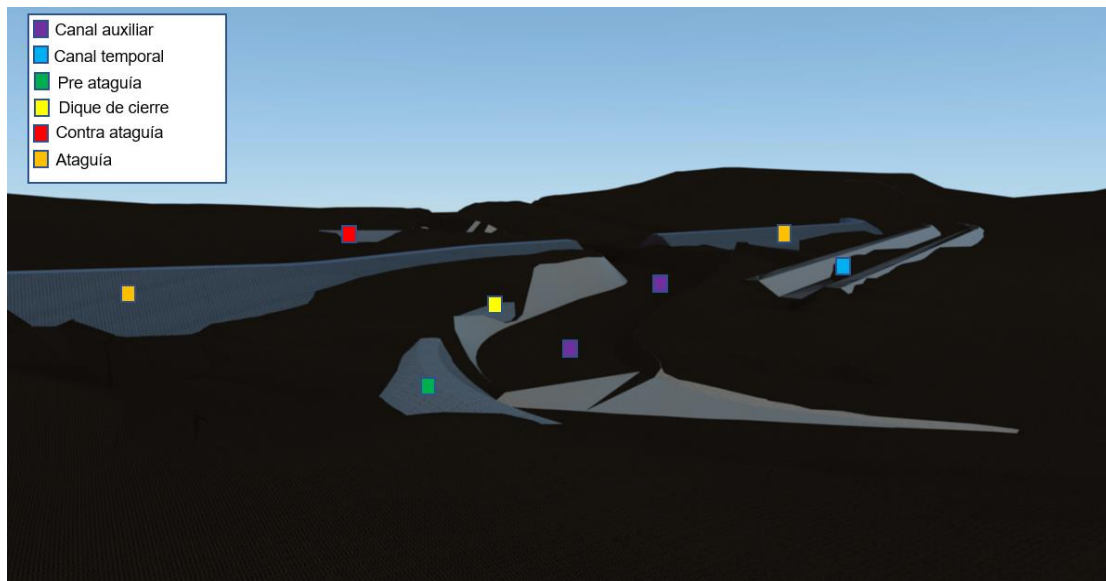


Figura 33. Render vista norte de las obras de desvío, obtenida de Navisworks.



Figura 34. Obras de desvío, vista sur en Navisworks.

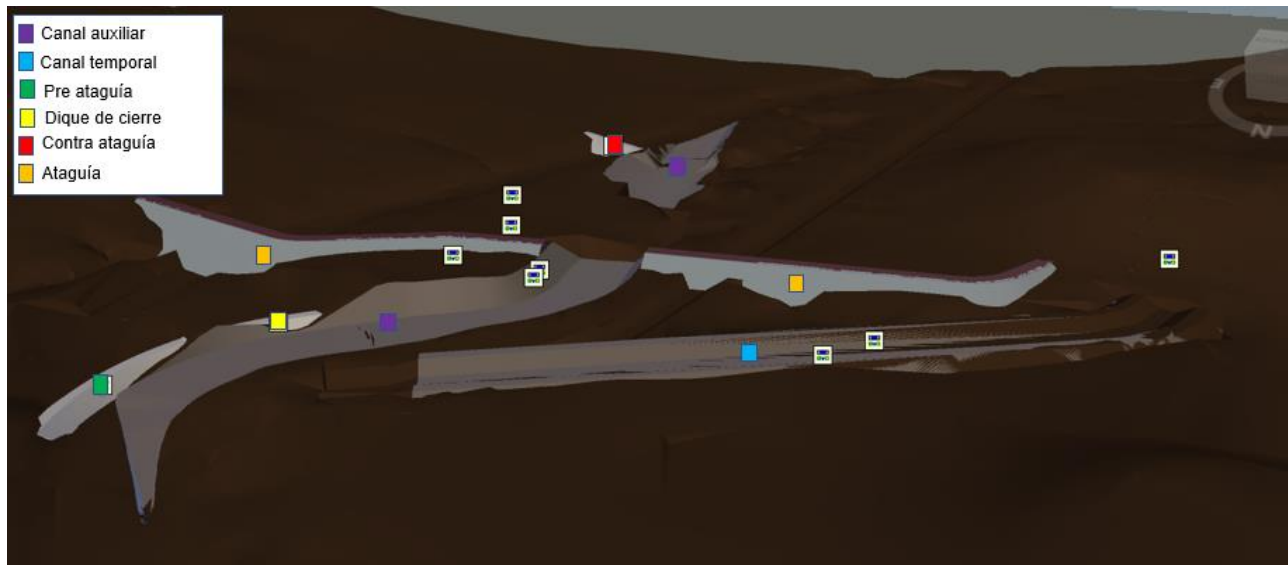


Figura 35. Obras de desvío, vista noroeste en Navisworks.

Se modeló también, de manera que se vieran primeramente las partes altas de la ataguía en la simulación. A continuación, en la Figura 36 se presentan las partes altas de la ataguía, que se pretenden construir primero.

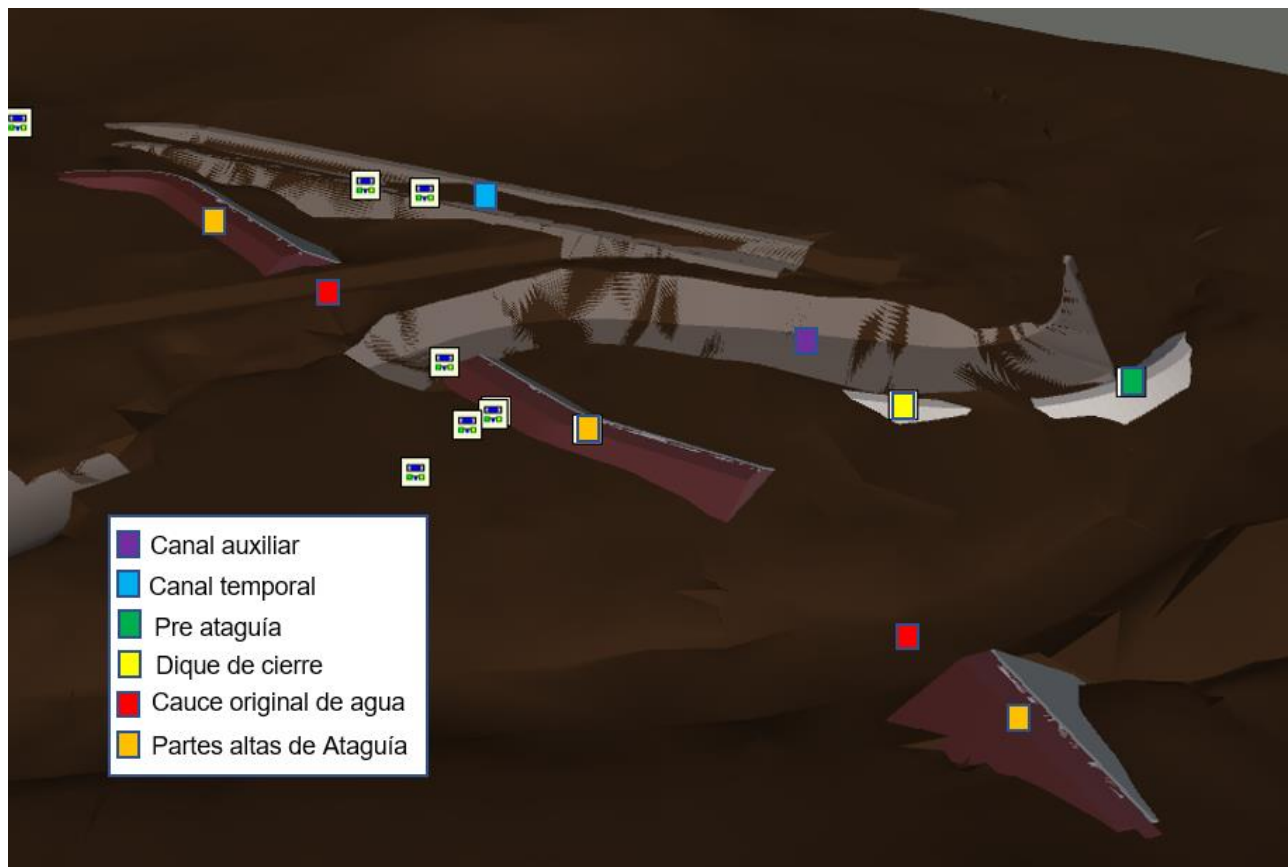


Figura 36. Partes altas de la ataguía principal.

A partir del modelo 4D se realizó la cuantificación de los materiales a utilizar en las obras. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 37, donde se tiene la cuantificación de los materiales de los rellenos de las partes altas de la ataguía principal. Se realizó lo mismo para todas las obras, y se obtuvieron las cantidades de material para cada obra.

Estado	WBS	Nombre	Perímetro	Área	Volumen	Peso
7.1.1		Relleno principal				
7.1.1.1		SOLIDOS - Ataguía parte 1 - Top Relleno	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00
7.1.1.2		SOLIDOS - Ataguía parte 1 - Ignimbritas procesadas	0,000 m	0,000 m ²	3.588,631 m ³	0,00
7.1.1.3		SOLIDOS - Ataguía parte 1 - Datum	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00
7.1.1.4		SOLIDOS - Ataguía parte 1 - CA	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00
7.1.1.5		SOLIDOS - Ataguía parte 3 - Ignimbritas procesadas	0,000 m	0,000 m ²	3.390,307 m ³	0,00
7.1.1.6		SOLIDOS - Ataguía parte 3 - Top Relleno	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00
7.1.1.7		SOLIDOS - Ataguía parte 5 - CA	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00
7.1.1.8		SOLIDOS - Ataguía parte 5 - Datum	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00
7.1.1.9		SOLIDOS - Ataguía parte 5 - Ignimbritas procesadas	0,000 m	0,000 m ²	4.862,463 m ³	0,00
7.1.1.10		SOLIDOS - Ataguía parte 5 - Top Relleno	0,000 m	0,000 m ²	0,000 m ³	0,00

Figura 37. Cuantificación de materiales de las obras de desvío en Navisworks.

A continuación, en el Cuadro 13 y en el Cuadro 14, se detallan las cantidades de material para los elementos de las obras de desvío, tanto para los materiales no volumétricos como los volumétricos, respectivamente. Cabe recordar que, el material para todas las obras es de ignimbritas, en algunas con una granulometría más grande que otras.

Cuadro 13. Resumen de cantidades de material no volumétrico.

Cantidades material de las obras de desvío		
Elemento	Cantidad	Unidad
Geomembrana HDPE Ataguía	3300	m ²
Alcantarillas de manejo de aguas superficiales	100	ml

Cuadro 14. Resumen de cantidades de material para elementos de obras de desvío.

Cantidades de Volumen para las obras de desvío			
Elemento	Corte (m ³)	Relleno (m ³)	Neto (m ³)
Excavación del canal auxiliar	84630	71	84559
Canal temporal de riego	969	15747	-14777
Preataguía	1	1723	-1722
Dique de cierre	0	316	-316
Excavación de ataguía	23669	701	22968
Contraataguía	1	2591	-2590
Ataguía parte seca relleno	0	11841	-11841
Ataguía parte mojada relleno	0	22169	-22169
Arena fina ataguía	0	524	-524
RIPRAP Ataguía	0	1522	-1522
Totales	109271	57206	52065

Se puede analizar de las cantidades de material calculadas que, las obras que requerirán de mayor cantidad de volúmenes a excavar son el canal auxiliar con un volumen aproximado de 84630 m³ y la excavación de la cimentación de la ataguía la cual tendrá un aproximado volumen de corte de 23670 m³. Asimismo, se determinó que la ataguía será la estructura con mayor cantidad de material de relleno, la cual tendrá un total aproximado de 34000 m³. De esta manera se vio que se realizarán más excavaciones que rellenos en términos de cantidad de material.

El modelo 4D fue de gran utilidad para llegar a la planificación final de las obras de desvío. Como se ha mencionado, este es un proyecto de infraestructura hidráulica de muy grandes dimensiones, lo cual implica, en este caso en específico, que las obras de desvío se ligen o dependan de otras obras para una correcta ejecución y puesta en marcha del desvío del río y del canal de riego. Esto implica que, se deba coordinar tanto el diseño, como la planificación, la ejecución y el control de todas las obras del proyecto (presa principal, ataguías, vertedero, túnel de conducción, toma de aguas, casa de máquinas, etc.), por lo que, esta metodología fue de gran ayuda en ese sentido, y en la correcta planificación de la intersección o asociamiento con las obras dependientes del desvío. Asimismo, el plan de trabajo de las obras, presentado en la sección anterior, forma parte de todo el proceso constructivo de las mismas, por lo que, también requieren de una correcta planificación, organización, planificación y control; lo cual es de gran complejidad si se utilizan métodos tradicionales o manuales de planificación.

Utilizar Navisworks para realizar el modelo 4D de las obras de desvío del embalse Río Piedras fue de gran utilidad. Este se decidió utilizar debido a la facilidad para generar las simulaciones a partir de la integración entre el modelo 3D y la programación de obra. Como menciona AUTODESK, (2022), este programa permite visualizar y unificar los datos de diseño y construcción dentro de un solo modelo, ayuda a identificar y resolver interferencias antes de comenzar la construcción, entre otros aspectos. Por lo tanto, fue de gran ayuda para identificar mejor el orden de las actividades, para realizar una correcta cuantificación de los elementos, especialmente los del corredor de la ataguía, así como para realizar una debida planificación de trabajo.

El modelo 4D buscaba integrar y coordinar los elementos de las obras con la planificación de las obras, de manera que lo que se realizará en la etapa de ejecución, sea el resultado de una planificación eficiente y bajo un proceso de revisión exhaustiva, hasta llegar al nivel necesario de validación de datos e información.

A continuación, se muestra en la Figura 38, un gráfico con la ordenada masa de cada obra de desvío. Los valores en positivo son los volúmenes netos de corte, mientras que los valores negativos son los volúmenes netos de rellenos. Por lo que, se puede ver que, resultará un total de 52065 m³ de material en corte. Este material resultará mayoritariamente proveniente de la excavación del canal auxiliar, tal y como se muestra en el gráfico y como ya se analizó.

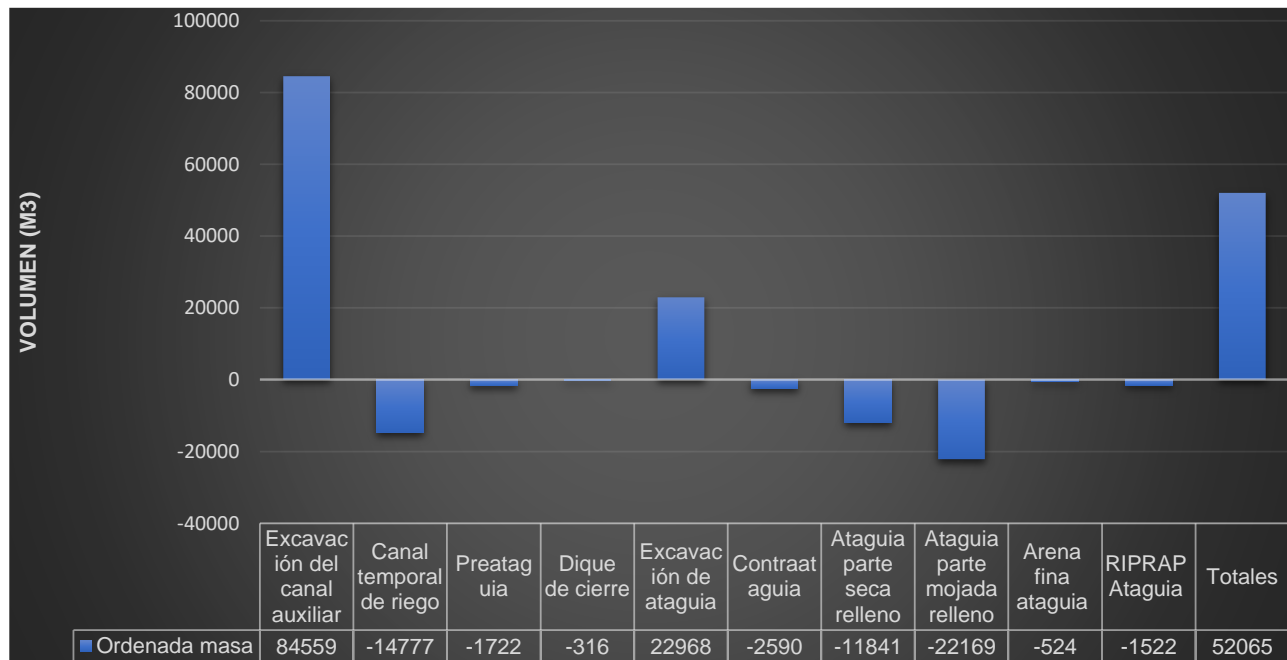


Figura 38. Ordenada masa del movimiento de tierras de las obras de desvío.

6.3.2. Duración de los trabajos

Las duraciones de las actividades generales se pueden observar en el Cuadro 15, y además se muestra que la duración de las obras de desvío es de 294 días hábiles, lo cual, se convierte en aproximadamente 13 meses de trabajo que se invertirán en la construcción de estos elementos para el desvío del Río Piedras y el canal de riego. Asimismo, es importante mencionar que no solo se incluye el tiempo de los desvíos, sino también el de la construcción de las alcantarillas de desvío, la construcción del túnel de conducción y las obras asociadas, lo cual no forma parte como tal de las obras de desvío. Esto puede provocar que parezca que se excede el periodo estipulado inicialmente por la administración técnica de PAACUME para las obras de desvío. Sin embargo, si se eliminara la duración de estas grandes obras, se observa que la duración de la construcción de las obras de desvío como tal, sería de aproximadamente 6 meses.

Cuadro 15. Duración de las actividades de las obras de desvío.

Duración de las actividades	
Actividad	Duración
Obras de desvío	294 días
Desmonte y limpieza	12 días
Excavación del canal auxiliar	32 días
Construcción de alcantarillas	205 días
Construcción del tunel de conducción, toma de aguas, cámara disipadora y canal de conexión	190 días
Construcción de ataguía	27 días
Construcción del canal temporal	22 días
Continuación del canal auxiliar	6 días
Construcción del dique de cierre	2 días
Construcción de pre ataguía	6 días
Construcción de contraataguía	9 días
Continuación de la ataguía	33 días
Colocación de geomembrana, arena fina y trinchera	8 días
Construcción del Rip Rap	1 días

En el Cuadro 16, se muestra a detalle cada actividad y su respectiva duración. Se analiza más adelante, con la programación de las obras, debido a que no se pueden apreciar con gran detalle las precedencias y la relación paralela entre algunas actividades. Sin embargo, se confirma que la excavación de la ataguía, la construcción de la ataguía, y la excavación del canal auxiliar son las obras que requerirán de mayor tiempo debido a sus cantidades de material (esto sin considerar la construcción de la descarga de fondo y el túnel de conducción).

Cuadro 16. Duración de cada actividad específica de las obras de desvío.

Duración de las actividades	
Actividad	Duración
Obras de desvío	294 días
Desmonte y limpieza	12 días
Excavación del canal auxiliar	32 días
Excavación del material del canal auxiliar(sin topar con el río)	25 días
Transporte de material a la escombrera	7 días
Construcción de las alcantarillas de desvío	205 días
Construcción del tunel de conducción, la toma de aguas, camara disipadora y canal de conexión	190 días
Construcción de ataguia	27 días
Excavación en las partes secas de la ataguia	9 días
Excavación del material de la ataguia	7 días
Transporte del material a la escombrera	2 días
Rellenos de prueba de las partes excavadas de la ataguia	18 días
Transporte de material desde el tajo	4 días
Compactado de material	14 días
Construcción del canal temporal	22 días
Excavación de las partes altas del canal temporal	1 día
Transporte del material a la escombrera	1 día
Construcción de las alcantarillas y cunetas de drenaje superficial	6 días
Transporte de material del tajo al canal temporal	3 días
Compactado del material	18 días
Continuación de la excavación del canal auxiliar	6 días
Excavación del canal auxiliar (topar con el río)	5 días
Transporte de material a la escombrera	1 día
Construcción del dique de cierre en el canal de desvío	2 días
Transporte de material desde el tajo	1 día
Compactado del material	1 día
Construcción de la preataguia	6 días
Transporte de material desde el tajo	2 días
Compactado del material	4 días
Construcción de la contraataguia	9 días
Transporte de material desde el tajo	3 días
Compactado del material	6 días
Continuación de la ataguia	31 días
Excavación en el río y demás partes bajas de la ataguia	3 días
Excavación del material de la ataguia	2 días
Transporte del material a la escombrera	1 día
Rellenos en las partes excavadas de la ataguia	28 días
Transporte de material desde el tajo	6 días
Compactado de material	25 días
Colocación de la geomembrana y la arena fina y trinchera (Ataguia)	2 días
Vaciado de una capa pequeña de arena fina en el talud aguas arriba	1 día
Colocación de la geomembrana y extendido	4 días
Relleno de la trinchera con arena fina y compactación	1 día
Vaciado de otra capa de arena fina por encima de la geomembrana	1 día
Anclaje de la geomembrana mediante un aluvión en la parte baja	1 día
Construcción del Rip Rap	1 día
Colocación de las rocas de diametro de 0.6 a 1.2 m max.	1 día

Debido a la gran cantidad de tiempo que requieren estas dos grandes obras (descarga de fondo y túnel de conducción) para su construcción, es que la totalidad de las obras de desvío duran más de un año según lo que se estimó. Por lo que, las obras deberían iniciarse unos meses antes de lo planeado si se quiere seguir lo estipulado a nivel macro por la administración técnica de PAACUME, en donde se dice que las obras de desvío deben finalizar en julio del 2025.

En el Apéndice 2 se puede apreciar a nivel más detallado cada una de las actividades, su duración y sus fechas de inicio y fin, en la programación de las obras que se realizó en MS Project.

En la figura 39, se pudo visualizar de mejor manera las fechas de inicio y fin de cada actividad, de lo cual se puede analizar que, se inicia en enero del año 2025 y se finaliza en enero del año 2026. Sin embargo, se puede notar que la tarea 4 y 5, corresponden a la construcción de la descarga de fondo y el túnel de conducción, respectivamente. Estas obras se contemplan en la programación de las obras de desvío, debido a que son necesarias y deben estar finalizadas al momento de realizar el desvío. Sin embargo, no forman parte como tal del desvío en sí y las maniobras necesarias para llevarlo a cabo. Debido a la estructuración propuesta de las actividades, en donde el canal auxiliar se inicia antes de iniciar con la construcción de estas obras, es que aparecen en la programación.

Nombre de tarea	Comienzo	Fin
▸ Obras de desvío 1	2/1/25 6:00 a.m.	5/1/26 6:00 p.m.
1 Inicio del proyecto	2/1/25 6:00 a.m.	2/1/25 6:00 a.m.
2 Desmonte y limpieza	2/1/25 6:00 a.m.	15/1/25 6:00 p.m.
▸ 3 Excavación del canal auxiliar	9/1/25 6:00 a.m.	14/2/25 6:00 p.m.
4 Construcción de las alcantarillas de desvío	15/2/25 6:00 a.m.	27/10/25 6:00 p.m.
5 Construcción del tunel de conducción, la toma de aguas, camara disipadora y canal de conexión	15/2/25 6:00 a.m.	9/10/25 6:00 p.m.
▸ 6 Construcción de ataguia	15/2/25 6:00 a.m.	18/3/25 6:00 p.m.
▸ 7 Construcción del canal temporal	19/3/25 6:00 a.m.	21/4/25 6:00 p.m.
▸ 8 Continuación de la excavación del canal de desvío del río	28/10/25 6:00 a.m.	3/11/25 6:00 p.m.
▸ 9 Construcción del dique de cierre en el canal auxiliar	4/11/25 6:00 a.m.	5/11/25 6:00 p.m.
▸ 10 Construcción de la preataguia	6/11/25 6:00 a.m.	12/11/25 6:00 p.m.
▸ 11 Construcción de la contraataguia	6/11/25 6:00 a.m.	15/11/25 6:00 p.m.
▸ 12 Continuación de la ataguia	17/11/25 6:00 a.m.	25/12/25 6:00 p.m.
▸ 13 Colocación de la geomembrana y la arena fina y trinchera (Ataguia)	26/12/25 6:00 a.m.	3/1/26 6:00 p.m.
▸ 14 Construcción del Rip Rap	5/1/26 6:00 a.m.	5/1/26 6:00 p.m.
15 Fin del proyecto	5/1/26 6:00 p.m.	5/1/26 6:00 p.m.

Figura 39. Programación de las obras de desvío del embalse Río Piedras, MS Project.

A nivel macro, para las obras de desvío, la administración técnica de PAACUME estipuló como fecha de inicio el mes de enero del 2025 y fecha final en julio del 2025, lo cual se intentó ajustar a lo programado. Sin embargo, y como se podrá apreciar en la programación, debido a las grandes obras de la construcción de las alcantarillas y el túnel de conducción, se prolongará por poco más de un año. Asimismo, pese a que la jornada de trabajo normalmente es de 8 horas, se estimó una de 12 horas de acuerdo con recomendaciones que realizó el Ing. Osvaldo Quiros. Esto, considerando que el contratista deberá contratar dos grupos de cuadrillas para respetar las horas de trabajo máximas diarias establecidas por el ministerio de trabajo.

Debido a la duración de estas grandes obras, se estaría terminando mucho tiempo después de julio del año 2025. Por lo anterior, y considerando que esas grandes obras no forman parte como tal del desvío, podría iniciarse la construcción de ellas unos meses antes, para que, las obras que si forman parte del desvío en sí, se den en el periodo estipulado; y que, además, la construcción de la ataguía en las partes más bajas, así como el desvío del río, se den en verano, para poder evitar cualquier accidente o atraso por posibles crecidas en el río. A manera representativa de lo que se está mencionando, se presenta la Figura 40, una modificación realizada en la fecha de inicio de las obras, observando que, si se inicia en mayo del 2024 a construir las alcantarillas de desvío y el túnel de conducción, para finales de abril del 2025 se estará finalizando por completo el desvío. Además, se observa que el desvío del río y la construcción de las partes bajas de la ataguía se da entre los meses de febrero y abril, siendo aún verano, por lo que esto sería muy ventajoso para evitar cualquier atraso en la programación debido a una crecida del río. No obstante, queda a criterio de la administración técnica de PAACUME si se requiere modificar de esta manera o no, de modo que, se integre con la ejecución de las demás obras. Esto debido a que, no se conoce con exactitud, ni se tiene control de las fechas de inicio de la construcción de esas dos grandes obras, y tal como se pudo identificar, no se calcularon las duraciones específicas para su construcción debido a que no formó parte del alcance de este proyecto. Fue por tal motivo que se decidió dejar como programación final de las obras, la mostrada inicialmente en la figura anterior (Figura 39).

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1 Obras de desvío 1	296 días	2/5/24 6:00 a.m.	21/4/25 6:00 p.m.
1 Inicio del proyecto	0 días	2/5/24 6:00 a.m.	2/5/24 6:00 a.m.
2 Desmonte y limpieza	12 días	2/5/24 6:00 a.m.	15/5/24 6:00 p.m.
▷ 3 Excavación del canal de desvío	32 días	9/5/24 6:00 a.m.	14/6/24 6:00 p.m.
4 Construcción de las alcantarillas de desvío	205 días	15/6/24 6:00 a.m.	10/2/25 6:00 p.m.
5 Construcción del tunel de conducción, la toma de aguas, camara disipadora y canal de conexión	190 días	15/6/24 6:00 a.m.	23/1/25 6:00 p.m.
▷ 6 Construcción de ataguia	27 días	15/6/24 6:00 a.m.	16/7/24 6:00 p.m.
▷ 7 Construcción del canal temporal	29 días	17/7/24 6:00 a.m.	19/8/24 6:00 p.m.
▷ 8 Continuación de la excavación del canal de desvío del río	6 días	11/2/25 6:00 a.m.	17/2/25 6:00 p.m.
▷ 9 Construcción del dique de cierre en el canal de desvío	2 días	18/2/25 6:00 a.m.	19/2/25 6:00 p.m.
▷ 10 Construcción de la preataguia	6 días	20/2/25 6:00 a.m.	26/2/25 6:00 p.m.
▷ 11 Construcción de la contraataguia	9 días	20/2/25 6:00 a.m.	1/3/25 6:00 p.m.
▷ 12 Continuación de la ataguia	34 días	3/3/25 6:00 a.m.	10/4/25 6:00 p.m.
▷ 13 Colocación de la geomembrana y la arena fina y trinchera (Ataguia)	1 día	11/4/25 6:00 a.m.	19/4/25 6:00 p.m.
▷ 14 Construcción del Rip Rap	1 día	21/4/25 6:00 a.m.	21/4/25 6:00 p.m.
15 Fin del proyecto	0 días	21/4/25 6:00 p.m.	21/4/25 6:00 p.m.

Figura 40. Programación de las obras de desvío con modificaciones representativas a modo de ejemplo, MS Project.

La herramienta “TimeLiner” del modelo 4D de Navisworks, permitió realizar una simulación de las obras constructivas de los desvíos que se deben realizar en el proyecto del embalse Río Piedras. Esta simulación se puede apreciar en el Apéndice 3. Asimismo, permitió identificar precedencias que debieron ser modificadas y tiempos de holgura que podrían aprovecharse para realizar otras obras del proyecto. A manera de ejemplo, inicialmente se propuso realizar la construcción del canal temporal de riego, paralelamente a la construcción de las partes altas de la ataguía, sin embargo y gracias a las simulaciones, se determinó que luego de que estas dos obras terminaran, quedaría un gran tiempo de holgura. Con esto se definió entonces que, se iniciará el canal temporal de riego una vez finalizados los rellenos de las partes altas de la ataguía, y así se aprovecharán los recursos que se desocuparán una vez finalizados los rellenos de la ataguía, y por lo tanto, se disminuirá ese tiempo de holgura.

6.3.3. Guía para el uso del modelo 4D

Se presenta en el Apéndice 4 la “Guía para el uso del modelo 4D en Navisworks de las obras de desvío del embalse Río Piedras”. A continuación, en la Figura 41, se muestra el contenido que se tiene en la guía.

Guía para el uso del modelo 4D en Navisworks de las obras de desvío del embalse Río Piedras
Proyecto Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del río Tempisque y Comunidades Costeras

Contenido

1. Descripción y disposiciones generales	3
2. Ingreso de datos	3
2.1. Ingreso del modelo 3D	3
2.2. Ingreso de la programación de MS Project	5
3. Modificaciones	7
4. Datos de salida	8
4.1. Cuantificación de materiales	8
4.2. Simulaciones constructivas	10
4.3. Propiedades de los elementos	10
5. Referencias bibliográficas	11

Figura 41. Tabla de contenido de la guía para el uso del modelo 4D.

Como se pudo apreciar, la guía cuenta con una descripción y disposiciones generales, en donde se detalla el objetivo que tiene la guía: el cual se basa en brindar un soporte técnico y apoyo al uso del modelo 4D creado, para su entendimiento y sus posibles modificaciones. Se pretende que la dirección técnica de PAACUME, mediante esta guía, tenga conocimiento y administración del modelo, y a su vez, conozca cómo realizar modificaciones en caso de que sea necesario al momento de la ejecución y control de las obras.

El segundo capítulo se refiere al ingreso de datos, el cual se subdivide en la integración del modelo 3D y la programación de MS Project. Para el ingreso del modelo 3D se detalló que se deben cargar los elementos como sólidos para que puedan ser cuantificados correctamente. Mientras que, para el ingreso de la programación de MS Project se indicó que, se debe realizar un enlazado entre las actividades y los elementos 3D para poder realizar las simulaciones posteriormente. Para esto, se presentó el paso a paso a seguir dentro de la guía. En el capítulo de modificaciones, se mostró cómo realizar modificaciones al modelo realizado y principalmente cómo sincronizar los datos con la programación realizada.

En el último capítulo de datos de salida se presentan 3 apartados, los cuales servirán para identificar las instrucciones a seguir para poder obtener la cuantificación de materiales, las simulaciones constructivas, y las propiedades de los elementos.

7. Conclusiones

- Se determinó un adecuado diseño del proceso constructivo que permite dar solución al reto de desviar, tanto el Río Piedras como el canal de riego durante la construcción del sitio de presa. Esto debido a que, se realizó un plan de trabajo que contempló la programación de los requerimientos de obra mediante un modelo 4D, y una adecuada propuesta del orden de las actividades. Los cuales se basaron en una detallada definición y análisis de los materiales disponibles, la mano de obra y la maquinaria necesaria.
- La ignimbrita se vuelve un elemento clave para el aprovechamiento de los materiales, haciendo eficiente y óptimo el proceso constructivo, gracias a la disponibilidad y cercanía del material y a sus propiedades mecánicas adecuadas, que presentan valores adecuados para ser utilizados en la construcción del proyecto.
- Definir 3 etapas de excavación separadas en la etapa preliminar, la etapa fundamental y la etapa final permitió determinar un adecuado método de excavación y movimiento de tierras, que funcionó para definir correctamente las actividades y el orden de estas, así como una adecuada estrategia para el acarreo de los materiales donde la localización de las escombreras se volvió supremamente importante.
- Es importante conocer a detalle las propiedades de los materiales a utilizar y el acabado final de los taludes excavados y compactados, para lograr determinar si es requerido realizar tratamiento superficial. Esto debido a que, de lo contrario, si esto se realiza y no es necesario, se incurre en realizar más actividades, y por ende, aumentarían los tiempos y costos del proyecto. En este caso, se determinó que no es necesario realizar tratamientos superficiales en ninguno de los elementos de desvío, a excepción de la ataguía principal.
- Definir sitios de almacenamiento de materiales cercanos a las obras, como lo fue la escombrera 4, fue de gran importancia. Esto permitió optimizar periodos de tiempo de transporte de materiales y mejorar la gestión de los materiales excavados aprovechables; y por lo tanto, permitió optimizar el diseño de sitio. Esto gracias a que se definieron las rutas de acarreo de materiales más cortas, en donde las escombreras y el diseño de sitio fueron factores determinantes. Lo cual permitió establecer los rendimientos de acarreo más altos.
- La logística constructiva determinada se basó en el orden de las actividades y en dar solución al reto de construir los desvíos durante la construcción del sitio de presa. La cual consistió en iniciar la excavación del canal auxiliar de manera parcial, sin topar con el río. Luego se propuso construir de forma paralela la descarga de fondo y la toma de aguas, el túnel de conducción y el canal de restitución. Debido a la gran duración de estas últimas obras se propuso de forma paralela también construir las partes altas de la ataguía aprovechando así para hacer los rellenos de prueba. Seguido se realizarán las excavación y rellenos del canal temporal (se debe programar la construcción de los muros de elevación del sifón de salida). Una vez finalizado la construcción de todo lo anterior, se propuso finalizar la excavación del canal auxiliar conectándolo con el río. Posteriormente se propuso construir el dique de cierre, para después construir la preataguía y la contraataguía de manera paralela. Finalmente se propuso terminar la construcción de la ataguía y su respectiva protección en la cara aguas arriba. Se consideró de esta manera debido a que se abarcó tanto la solución al problema mencionado como la optimización de los procesos constructivos al realizar tareas de forma paralela, disminuyendo así los tiempos de trabajo, y considerando la dependencia que existe entre las diferentes obras que se construirán.

- Una correcta definición de las precedencias de las actividades permitió programar tareas paralelas, lo cual disminuyó el tiempo que se invertirá en su construcción. De la misma manera, definir los rendimientos, considerando tiempos productivos y no productivos, permitió crear una planificación con tiempos más cercanos a la realidad, lo que optimiza el plan de trabajo de la mejor forma posible.
- Se determinó que la ruta crítica se da en el desvío del río, a partir de la construcción de la contraatagüa debido a la secuencia fin-comienzo que tienen las actividades, lo cual implica que se deba dar un eficiente uso de la logística propuesta para el acarreo de los materiales y así evitar atrasos en disponibilidad de materiales y los procesos constructivos respectivos. Por lo tanto, cumplir con los plazos estimados será de gran importancia para evitar atrasos en el proyecto, para lo cual es muy importante realizar estos procesos en verano, de manera que se eviten crecidas en el río.
- La excavabilidad del terreno fue un factor muy importante al definir la maquinaria a utilizar. Se determinó que se utilizará maquinaria como excavadoras hidráulicas, debido a que permiten con facilidad la excavación del suelo analizado.
- La logística de acarreo de materiales, mano de obra y equipos fue determinada mediante una serie de cálculos y análisis, lo que permitió establecer los rendimientos adecuados para determinar las duraciones. Por lo que, se debe seguir lo planeado respecto a esto, para lograr las duraciones planificadas.
- Las duraciones de las actividades fueron determinadas a partir de la hoja de cálculo de Excel, en donde se obtuvo el producto de las cantidades de material y los rendimientos de las cuadrillas. Por lo que, los requerimientos de obra fueron sumamente importantes para lograr establecer un cronograma adecuado a la magnitud de las obras.
- El uso de herramientas de modelado 4D, como Navisworks, permitió amplias ventajas en la planificación de estas obras de infraestructura, ya que permitió ver datos como cuantificaciones de materiales e identificar interferencias entre diferentes estructuras.
- Se determinó mediante las cuantificaciones realizadas con el modelo 4D que las actividades como la atagüa principal y la excavación del canal auxiliar son las obras con mayor cantidad de movimiento de tierras, las cuales tienen un volumen aproximado de 34000 m³ en relleno y 84630 m³ en corte respectivamente y por ende las que tuvieron mayor duración. Esto se pudo también verificar al determinar que en total se requerirán de aproximadamente un mes para la construcción de la primera parte de la atagüa y aproximadamente otros 2 meses hábiles para su finalización, mientras que para la excavación del canal auxiliar se requerirá en total de aproximadamente mes y medio, por lo que son las obras de desvío con mayor duración.
- Utilizar Civil 3D para la generación de modelos de movimientos de tierra, de diques o canales fue de gran ayuda, ya que este programa permitió mejor adaptación a las irregularidades del terreno y presentó buenos resultados para visualizar los modelos en 3D, así como el uso de la herramienta Subassembly Composer para la mejor definición de perfiles. Sin embargo, requirió de gran tiempo de procesamiento de datos.
- Realizar una adecuada programación en MS Project, que integre desde definir adecuadamente sus opciones de programación y un correcto calendario de trabajo, hasta una correcta definición de precedencias, duraciones y recursos necesarios para cada actividad, permitió tener un mejor

control de la planificación, así como una adecuada herramienta para la generación de simulaciones constructivas.

- Se contribuyó a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente al 12.5, reduciendo la generación de desechos mediante actividades como el aprovechamiento del material disponible y su reutilización, asimismo al objetivo 12.8 asegurando que las personas tengan la información y conocimiento para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza debido a que se logró aportar al conocimiento de la construcción de este tipo de obras aprovechando los recursos y en armonía con la naturaleza, gracias a la estrategia de acarreo de materiales y la estrategia utilizada para el plan de trabajo definida.

8. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un monitoreo y mantenimiento periódico a las estructuras, una vez entren en funcionamiento, para evitar alto grado de erosión de las paredes debido al constante flujo de agua, tales como verificar la compactación, monitorear infiltración del agua en las estructuras, realizar estudios de laboratorio para confirmar el punto de saturación y condiciones de compactación óptimas y permeabilidad, control de deformaciones y calidad a largo plazo de los materiales.
- Se recomienda establecer una fecha de inicio de las obras, de manera que, las partes bajas de la ataguía sean construidas durante el verano y así se eviten accidentes debido a las crecidas del río.
- Se recomienda integrar el diseño y planificación de los muros de elevación del nivel del agua del canal de riego, para mejorar así el proceso constructivo y contemplar la totalidad del desvío del canal de riego.
- Se recomienda realizar el paro de operación del canal de riego para su correspondiente desvío en el tiempo de holgura que se encuentra luego de finalizar los rellenos del canal temporal y antes de iniciar con los rellenos de las partes altas de la ataguía.
- Se recomienda realizar un plan de acción y control sobre los tajos, de manera que, el material esté debidamente procesado y listo en el momento que se necesite llevar a las obras de desvío para construir los rellenos.
- Para un correcto desarrollo de los modelos, es recomendable ser ordenado y detallar al máximo los elementos creados en los modelos, dándoles las dimensiones, propiedades y asociación adecuada con otros elementos, para lograr obtener una simulación lo más cercana a la realidad.
- Para determinar un mejor control de las actividades y procesos a realizar, se recomienda que las personas encargadas de administrar y procesar la información realicen visitas continuas al campo durante la ejecución de las obras, para facilitar la comprensión de datos y dar a los trabajadores la oportunidad de aportar ideas para mejorar los procesos a partir de sus interpretaciones.
- Se recomienda realizar controles de los rendimientos reales que se den una vez iniciadas las obras, para ajustar los rendimientos que se planearon inicialmente y así poder contar con datos reales para su ejecución y control de obra. Se puede optar por el uso de métodos para el control de la producción de la obra, tales como “Crew Balance”, “Work Sampling”, “Muestreo de trabajo para la toma de decisiones” y “Five Minute Rating”.
- Se recomienda que, se realice mantenimiento preventivo y periódico a la maquinaria utilizada para así evitar cualquier daño grave en esta, y que, por ende, se provoquen grandes atrasos en la construcción.
- Cuando se contrate personal encargado de administrar la ejecución de las obras o al contratista, se debe dar capacitación e indicar todos los detalles en el cartel de licitación, sobre el proceso constructivo que se planteó. Y se debe recomendar siempre utilizar equipo de protección personal (EPP) durante la ejecución de las obras.

- Se recomienda tener seguridad mediante un adecuado control, de que, el material que se va a acumular en la escombrera 4 va a ser utilizado posteriormente, para así evitar excesiva acumulación de material, y por ende apresamientos del agua del río debido a la cercanía de esta escombrera con el río.

9. Apéndices

Se muestran a continuación los apéndices referenciados a lo largo del documento, para los cuales se puede acceder haciendo “click” sobre el enlace de cada uno.

Apéndice 1. Cuantificaciones para las obras de desvío

Para tener acceso a la cuantificación de las obras de desvío, se debe ingresar en el siguiente enlace: **Enlace para el archivo de cuantificaciones y duraciones obras de desvío**

Apéndice 2. Programación de las obras de desvío

Para tener acceso a la programación de las obras de desvío en formato .mpp, se debe ingresar en el siguiente enlace: **Enlace para la programación de las obras de desvío.**

Para acceder a la programación de las obras de desvío en formato .pdf se debe ingresar en el siguiente enlace: **Programación de Obras de desvío.pdf**

Apéndice 3. Simulación constructiva de las obras de desvío

Para tener acceso a la simulación constructiva de las obras de desvío, se debe descargar el video que se encuentra en el siguiente enlace: **Enlace para la simulación constructiva de las obras de desvío4**

Apéndice 4. Guía para el uso del modelo 4D

Para tener acceso a la Guía para el uso del modelo 4D, se debe ingresar en el siguiente enlace: **Enlace para la guía para el uso del modelo**

10. Anexos

Se muestran a continuación los anexos referenciados a lo largo del documento, para los cuales se puede acceder haciendo “click” sobre el enlace de cada uno.

Anexo 1. Plano 1.2.010

Para tener acceso al plano de diseño 1.2.010, se debe ingresar en el siguiente enlace: **Plano 1.2.010.pdf**

Anexo 2. Plano 1.2.020

Para tener acceso al plano de diseño 1.2.020, se debe ingresar en el siguiente enlace: **Plano 1.2.020.pdf**

Anexo 3. Plano 4.1.030

Para tener acceso al plano de diseño 4.1.030, se debe ingresar en el siguiente enlace: **Plano 4.1.030.pdf**

11. Referencias

- Alán, M. (2021). *Conceptos sobre la Administración de Proyectos y su relación con la planificación y programación*. Cartago.
- Arellano, J. (2015). *Métodos de administración y control de obra*. México, D.F.
- Artola, A., & Roldán, E. (2021). *Diseño del plan de ejecución BIM para la construcción del Sitio de Presa y Casa de Maquinas en el Embalse Río Piedras - Proyecto de Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME)*. Cartago.
- AUTODESK. (5 de mayo de 2022). *Navisworks: 3D model review, coordination, and clash detection*. <https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=NAVSIM>
- AUTODESK. (23 de mayo de 2022). *Software de modelado 3D*. <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-modeling-software>
- BIMForum. (2020). *Level of development(LOD) specification part 1 & commentary*.
- BIMnD Building new dimensions. (2022). *Qué es el 4D en BIM?* <https://www.bimnd.es/que-es-el-4d-en-bim/>
- Bonilla R., Castillo E., Corrales K., (2002). *Análisis de opciones para la excavación de la Casa de Maquinas del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Construcción.
- Building SMART. (2021). *buildingSMART. ¿Qué es BIM?*: <https://www.buildingsmart.es/bim/>
- CSI. (2019). *OmniClass Introduction and User´s Guide*.
- Escuela Postgrado de Ingeniería y Arquitectura. (2022). *Cómo utilizar el método CPM, paso a paso*. <https://postgradoingenieria.com/como-utilizar-metodo-cpm/>
- Gerardi, J. (24 de mayo de 2022). *Qué es la planificación de las construcción: los pasos para el éxito*. <https://proest.com/es/construccion/proceso/planificacion/>
- ICE. (2018). *Informe de Diseño Planos y Especificaciones Proyecto: PAACUME R+io Tempisque Diseño final de las obras del proyecto*.
- Institute, P. M. (2008). *La guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)*. Cuarta Edición.
- Jimenez, R. (5 de mayo de 2022). *Organización de obras*. <https://es.slideshare.net/arquiman/01-organizacion-de-obras>
- Navarro Brenes K., (2010). *Análisis de productividad y rendimientos de operaciones y procesos de obra gris de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís*. (Licenciatura en Ingeniería en Construcción). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Project Management Institute. (2017). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*. Pennsylvania: Project Management Institute.

Seggiaro, Gorustovich, & Martí, J. (1987). *LAS IGNIMBRITAS DEL COMPLEJO VOLCANICO CORANZULI (PUNA ARGENTINA-ANDES CENTRALES)*.

Senara. (15 de abril de 2022). *Paacume*. <http://www.senara.or.cr/proyectos/paacume/Paacume.aspx>

Senara. (2018). *Especificaciones técnicas para la construcción de obras de riego y avenamiento*. San José.

Senara. (2018). *Estudio de Factibilidad proyecto Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras*.

Senara. (2020). *Informe de logística y estrategia en la construcción del canal auxiliar a lo largo del canal oeste tramo II*.

Vallejo, L. G. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson.