

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**TOMA DE DECISIONES POR ANÁLISIS DE VALOR EN LOS
PROCESOS DE EXCAVACIÓN DE SÓTANOS EN UNA EDIFICACIÓN
URBANA EN LA CIUDAD DE LIMA**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTOR:

Alfredo Victor Altamirano Garay
Andres Alberto Delgadillo Espinoza
Leonardo Manuel Cornejo Palacios
Leonidas Martin Coila Mamani
Marco Fabrizio Diaz Mora

ASESOR:

Carlos Raul Hoyos Vertiz
Lima, diciembre del 2021

Resumen

El presente trabajo de investigación se enfoca en el análisis de valor de los diferentes métodos de excavación con el fin de tener las pautas necesarias para saber cómo seleccionar la mejor alternativa. Para ello se emplea el método de ponderación lineal o Scoring de los múltiples criterios como costos, productividad, seguridad, contaminación ambiental y contaminación sonora eligiendo entre un conjunto de alternativas la que cause la mayor satisfacción posible.

También se incluye un análisis funcional que permite valorar los criterios de comparación en función de las necesidades de los clientes durante la etapa de excavación de sótanos. Finalmente, se aplican todos los conceptos referentes a rendimientos y costos de maquinarias pesadas para excavaciones masivas.

Para este estudio se analizará un edificio de 7 pisos, 5 sótanos y 1 cuarto de cisterna ubicado en el distrito de San Isidro, en la calle Chinchón 135. El proyecto contempla áreas para el uso en actividades culturales y cuenta con un área total de 966.42 metros cuadrados.

Palabras clave: Excavación masiva, sótanos, maquinaria pesada, análisis de valor.

Alfredo dedica este trabajo a sus padres, por el inmenso esfuerzo que hacen para que él haya llegado tan lejos; a su hermana por siempre estar presente y a sus padrinos, que en su momento fueron la luz que su familia necesitaba.

Andres dedica este trabajo a su familia y a todos los que le dan impulso a seguir adelante, aun cuando ya no están aquí.

Leonardo dedica este trabajo a su familia y amigos, por el apoyo y la comprensión constantes durante el transcurso de su carrera universitaria.

Martín dedica este trabajo a sus familiares, en especial a su abuelo Leonidas por el esfuerzo realizado para que él llegue a ser un profesional.

Marco dedica este trabajo a su familia, por su apoyo incondicional durante toda su etapa universitaria.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo de su asesor, Carlos Hoyos, y del ingeniero Jose Málaga por sus útiles comentarios de retroalimentación y su motivación a continuar el desarrollo de este. También agradecen a Adolfo Chavez & Arquitectos Asociados por prestar los planos de su proyecto para sobre la base de los mismos desarrollar la investigación.



Tabla de Contenidos

Resumen	II
Tabla de Contenidos	V
Índice de Tablas	VII
Índice de Figuras	IX
Capítulo 1: Generalidades	
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	1
1.3 Alcance	2
1.4 Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1.5 Metodología	2
Capítulo 2: Proyecto de estudio	4
2.1 Descripción del proyecto	4
2.2 Ubicación del proyecto	5
2.3 Accesibilidad a la zona del proyecto	5
2.4 Características del suelo	5
Capítulo 3: Estado del Arte	6
3.1 Métodos de Excavación	6
3.1.1 Excavación con excavadoras	6
3.1.2 Excavación con banquetas	8
3.1.3 Excavación con retiro de material mediante grúas	9
3.1.4 Excavación con faja transportadora	12
3.1.5 Excavación con excavadoras long reach	14
3.1.6 Método Mixto	16
3.2 Medición de costos unitarios	18
3.2.1 Productividad	18
3.2.2. Análisis de Precios Unitarios (APUs)	19
3.3 Método de Ponderación Lineal (Scoring)	20
3.4 Análisis Funcional	21
3.5. Análisis de Valor	23
3.5.1. Contaminación ambiental	24
3.5.2. Costo	25
3.5.3. Seguridad y salud	25
3.5.4. Productividad	26
3.5.5. Contaminación sonora	27

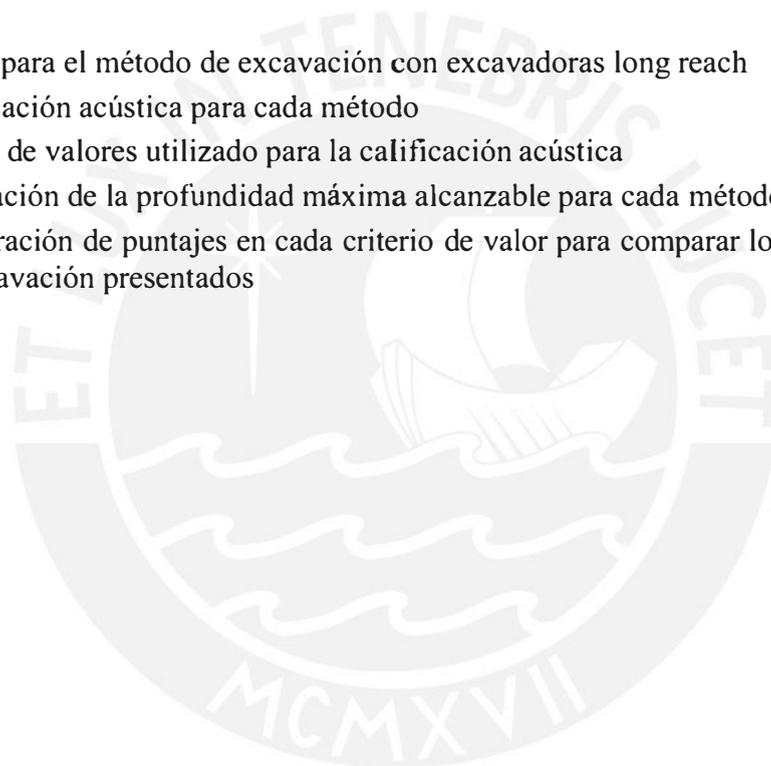
Capítulo 4: Desarrollo de la Investigación	29
4.1 Presentación de las Características de la Investigación	29
4.2 Estudio de Contaminación Ambiental Para Cada Método	29
4.3 Cálculo del Costo Para el Proyecto Elegido	32
4.4 Estudio de la Seguridad y Salud en Obra	37
4.5 Estudio Sobre Productividad	41
4.6 Estudio Sobre Contaminación Sonora	42
4.7 Profundidad máxima alcanzable	45
4.8 Análisis de Alternativas y Restricciones del Caso de Estudio	46
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	48
Bibliografía	49



Índice de Tablas

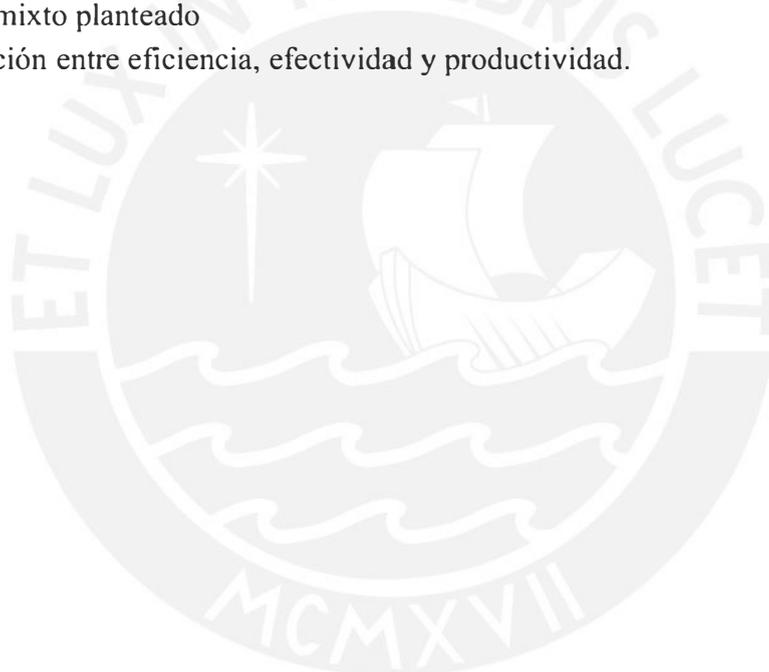
Tabla 1 Valores máximos para el ángulo de reposo del talud	8
Tabla 2 Longitud de fajas por número de sótanos	14
Tabla 3 Resumen de emisiones diarias producidas por cada método de excavación masiva	15
Tabla 4 Ejemplo de APU para la instalación de acero en zapata aislada de cimentación	20
Tabla 5 Matriz de necesidades y funciones.	22
Tabla 6 Determinación de la valoración de los criterios de análisis	23
Tabla 7 Apreciaciones de cada criterio de valor evaluado.	23
Tabla 8 Consumo de combustible de las maquinarias empleadas	24
Tabla 9 Clasificación de las magnitudes de riesgo	26
Tabla 10 Emisiones contaminantes producidas por la excavación con excavadoras	29
Tabla 11 Emisiones contaminantes producidas por la excavación con banquetas	30
Tabla 12 Emisiones contaminantes producidas por la excavación con retiro de material mediante grúa	30
Tabla 13 Emisiones contaminantes producidas por la excavación con faja transportadora y rampa	30
Tabla 14 Emisiones contaminantes producidas por la excavación con excavadoras long reach	31
Tabla 15 Cálculo de emisión del método mixto	31
Tabla 16 Rangos de valoración para la calificación de las emisiones de los métodos de excavación	31
Tabla 17 Resumen de emisiones diarias producidas por cada método de excavación masiva	32
Tabla 18 Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con excavadoras	33
Tabla 19 Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con banquetas	33
Tabla 20 Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con retiro de material mediante grúa	34
Tabla 21 Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con faja transportadora	34
Tabla 22 Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con excavadoras long reach	35
Tabla 23 Cálculo del precio unitario para el método mixto	36
Tabla 24 Rangos de costos unitarios para la valoración de cada método de excavación	36
Tabla 25 Resumen de precios unitarios para cada método de excavación y puntaje de los mismos	36
Tabla 26 Matriz IPER del método de excavación con excavadoras	37
Tabla 27 Matriz IPER del método de excavación con banquetas	38
Tabla 28 Matriz IPER del método de excavación con retiro de material mediante grúas	38
Tabla 29 Matriz IPER del método de excavación con faja transportadora	39

Tabla 30 Matriz IPER del método de excavación con long reach	39
Tabla 31 Matriz IPER del método mixto	40
Tabla 32 Rangos de valoración del riesgo para los métodos de excavación	40
Tabla 33 Resumen de riesgo para cada método de excavación y puntaje de los mismos	41
Tabla 34 Rango de valores de productividad para la asignación de puntaje	41
Tabla 35 Resumen de productividad para cada método de excavación y puntaje de los mismos	42
Tabla 36 Ruido para el método de excavación con excavadoras	42
Tabla 37 Ruido para el método de excavación con banquetas	43
Tabla 38 Ruido para el método de excavación con retiro de material mediante grúas	43
Tabla 39 Ruido para el método de excavación con retiro de material mediante faja transportadora	43
Tabla 40 Ruido para el método de excavación con excavadoras long reach	44
Tabla 41 Calificación acústica para cada método	45
Tabla 42 Rango de valores utilizado para la calificación acústica	45
Tabla 43 Evaluación de la profundidad máxima alcanzable para cada método	46
Tabla 44 Ponderación de puntajes en cada criterio de valor para comparar los métodos de excavación presentados	47



Índice de Figuras

Figura 1. Corte en elevación de la edificación	4
Figura 2. Ubicación de la edificación	5
Figura 3. Perfil estratigráfico del suelo del proyecto de estudio	5
Figura 4. Corte de talud con excavadora	6
Figura 5. Ángulo de reposo del talud θ	7
Figura 6. Proceso de excavación de rampa a banquetta	9
Figura 7. Vaciado de material en balde de grúa.	11
Figura 8. Grúa recogiendo material utilizando un cucharón de almeja.	11
Figura 9. Eliminación de material mediante grúa.	12
Figura 10. Eliminación de material con faja transportadora.	13
Figura 11. Excavadoras Long Reach.	15
Figura 12. Esquema de rampa (izquierda) y de fajas transportadoras (izquierda) para el sistema mixto planteado	18
Figura 13. Relación entre eficiencia, efectividad y productividad.	19



Capítulo 1: Generalidades

1.1 Introducción

Actualmente, la construcción de sótanos es un proceso común en el mundo, y su utilidad depende de la ubicación del proyecto. En Estados Unidos es común utilizar los sótanos como espacios de almacenamiento (ya sea de contenedores de agua o de alimentos no perecibles) o como cuartos adicionales a los que se tienen en la superestructura; mientras que, con el objetivo de cumplir con la creciente demanda de estacionamientos (dotación de estacionamientos por vivienda) de los edificios en el Perú, los sótanos son dedicados a espacios de estacionamiento. La construcción de esta parte de las estructuras requiere de procesos de excavación masiva, los cuales, en base a las características específicas del proyecto (área, profundidad, presupuesto, etc), requieren distintos tipos de maquinaria y procedimientos a seguir.

1.2 Justificación

Los procesos de excavación masiva constituyen una de las partidas más importantes dentro del proceso constructivo de una edificación, ya que esta demanda una cantidad considerable del presupuesto y tiempo de ejecución. Existen más de un método para la excavación de sótanos, que está limitado por la forma del terreno, tipo de suelo, número de sótanos, maquinaria, entre otros. Por ello, se debe realizar un análisis de valor de diferentes procesos de excavación a fin de determinar aquella que supondría el mínimo coste para el proyecto y que pueda cumplir con todas las exigencias de seguridad y productividad.

Se plantea el análisis de una edificación ubicada en el distrito de San Isidro que cuenta con 5 sótanos en su diseño. El área sobre el cual se proyectó la edificación es de 940 metros cuadrados aprox. ubicado en un suelo de gravas pobremente graduadas (GP). Se determinarán los ratios de eficiencia para poder determinar de manera concisa las alternativas de excavación más adecuadas para el área de terreno, cantidad de sótanos, tipo de suelo, entre

otros parámetros del proyecto.

1.3 Alcance

La investigación busca describir los costos, tiempos y seguridad que conlleva una excavación de sótanos mediante distintos métodos de excavación: excavación con faja transportadora y rampa, excavación con retiro de material mediante grúas, excavación con banquetas, excavación con excavadoras y excavación con excavadoras *long reach*. Asimismo, se explica el tiempo necesario para dichos métodos y la influencia que tienen en el cronograma de obra.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Elegir el proceso de excavación más conveniente para el proyecto de edificación con 5 sótanos en estudio ubicado en el distrito de San Isidro

Objetivos específicos

- ❖ Obtener los costos, productividad, riesgos a la salud y seguridad y contaminación asociada de cada uno de los procesos de excavación analizados en el proyecto analizado
- ❖ Realizar una comparación entre los procesos con base en los resultados obtenidos
- ❖ Determinar qué método de excavación resulta el más adecuado para el proyecto de acuerdo con la ponderación de las ventajas y desventajas encontradas

1.5 Metodología

La presente investigación busca definir criterios de elección de una forma de excavación masiva para una obra en Lima Metropolitana. Para ello, se requiere conocer el actual estado del arte; luego se desarrollará la investigación de las ventajas y desventajas de cada método presentado para una situación teórica de excavación masiva.

Primero, se definirán algunas formas de excavación masiva, con especial énfasis en los aspectos que pueden resultar particularmente ventajosos o perjudiciales, tales como

duración, relación con el sostenimiento de taludes y costos. Luego, se presentará definición y usos de los análisis de precios unitarios (APU) y del valor de productividad. Por último, se definirá el método de análisis de valor con la explicación de los criterios de valor a emplear en la comparación de alternativas.

En la etapa de desarrollo de la investigación, se presentará una situación teórica de excavación de sótano en la ciudad de Lima. Luego, se definirán los costos y el cronograma de obra para cada uno de los métodos estudiados. Finalmente, se comparan todas las alternativas mediante un análisis del valor.



Capítulo 2: Proyecto de estudio

2.1 Descripción del proyecto

El presente proyecto, desarrollado por Adolfo Chavez & Arquitectos Asociados, tiene un solo frente de salida hacia la calle Chinchón, consta de 06 sótanos destinados a estacionamientos y 07 niveles superiores en los cuales se contemplan áreas para el uso en actividades culturales como galerías de arte, museos de arte, librería y biblioteca. Se obtuvo las características relevantes siguientes:

- ❖ Profundidad máxima de excavación: 18.11 m
- ❖ Volumen de excavación: 17023.4 m³

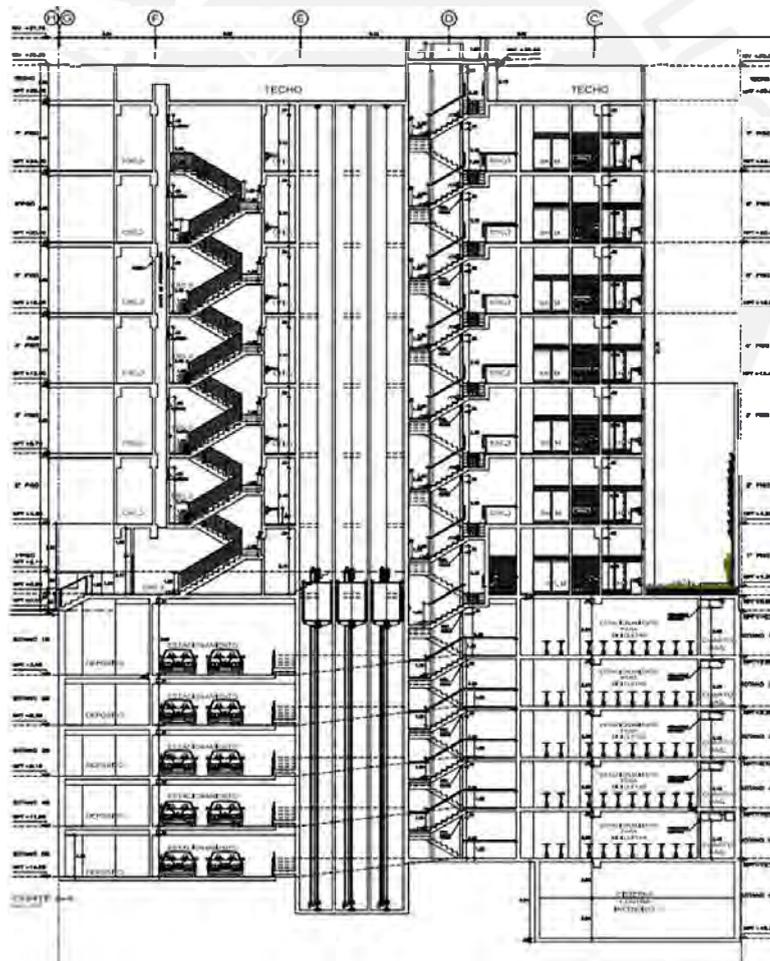


Figura 1. Corte en elevación de la edificación

Cortesía de Adolfo Chavez & Arquitectos Asociados

2.2 Ubicación del proyecto

El proyecto se desarrolla en la calle Chinchón 135, Mz 14 Lote C, urbanización San Isidro, Provincia de Lima, Departamento de Lima. Se encuentra ubicado sobre una superficie con una área total de 966.42 m².

2.3 Accesibilidad a la zona del proyecto

El predio presenta acceso por la calle Chinchón.



Figura 2. Ubicación de la edificación

Edición propia a partir de imagen tomada de Google Earth (2021)

2.4 Características del suelo

Para la exploración en campo, se realizaron 3 excavaciones a tajo abierto (calicatas) hasta una profundidad de 20 m. De lo observado en campo y de los resultados de laboratorio se tiene el perfil estratigráfico del suelo mostrado en la figura 3.

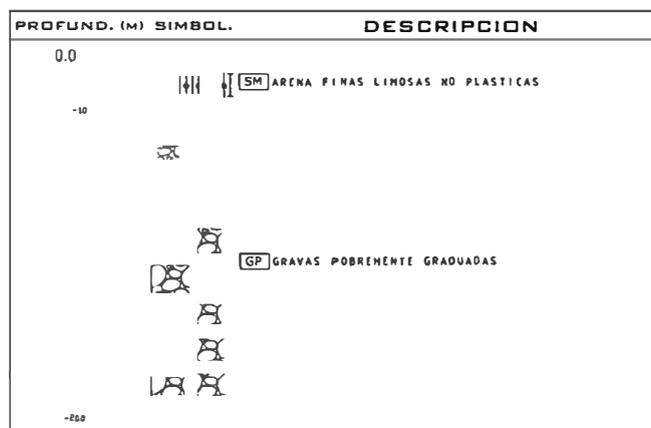


Figura 3. Perfil estratigráfico del suelo del proyecto de estudio

Capítulo 3: Estado del Arte

3.1 Métodos de Excavación

3.1.1 Excavación con excavadoras

Las excavadoras son maquinaria pesada sobre orugas que cuenta con un brazo hidráulico unido a un cucharón frontal. Debido a la fuerza que este brazo posee, las excavadoras pueden cortar material cohesivo, como arcillas, o material compactamente aglomerado, como el suelo GM típico de Lima.



Figura 4. Corte de talud con excavadora

Tomado de Pinterest (s.f.).

Esta excavadora se emplea desde la superficie para excavaciones poco profundas, pero por lo general requiere ingresar al terreno mediante rampas de ascenso y descenso. Por ello, es necesario conocer las características del terreno y las dimensiones de la maquinaria a utilizar para plantear un diseño adecuado de estas, de modo tal que las rampas sean seguras y suficientemente amplias.

El ángulo máximo de reposo del talud de la rampa (se elaboró la figura 5 para indicarlo) es un parámetro importante a tomar en cuenta en el diseño, pues extiende la rampa

por fuera del ancho de tránsito. Este valor depende de las características y condiciones del suelo. Algunos valores máximos para este ángulo se recogen en la tabla 2.1.

El uso de rampas como método de eliminación de material es muy efectivo, pues permite el ingreso de volquetes hasta el mismo punto de excavación, en donde se carga y acarrea el material hacia un botadero.

El proceso constructivo de la excavación con excavadora comprende los siguientes pasos:

1. Delimitar por sobre el terreno los límites de excavación y la rampa; también indicar los niveles.
2. Cortar el terreno y retirar el material con la excavadora en la zona de la rampa, cuidando de guardar el ángulo de reposo del talud hacia la rampa.
3. Cuando se llegue al nivel final de la rampa según lo indicado en el plano de la excavación, cortar el material hasta que toda el área se encuentre en ese nivel.
4. Retirar el material con volquetes que descienden al nivel cortado
5. Cortar los límites de acuerdo con lo que el método de sostenimiento prescriba.
6. Instalar el sostenimiento perimetral (tal como muros anclados o calzaduras)
7. Retirar la excavadora al mismo tiempo que se retira la rampa

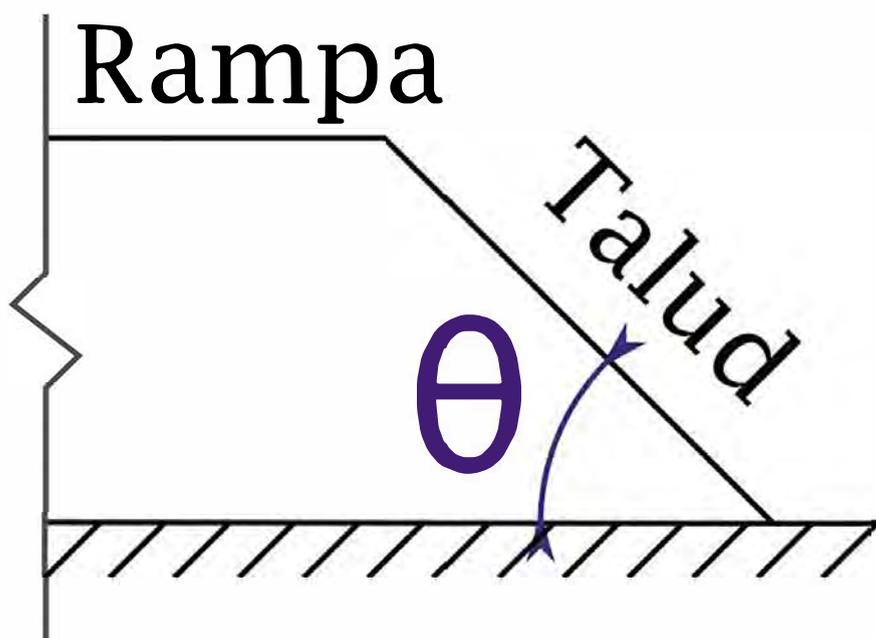


Figura 5. Ángulo de reposo del talud θ

Tabla 1

Valores máximos para el ángulo de reposo del talud.

Naturaleza del Terreno	Ángulo (grados)	
	Terreno seco	Terreno húmedo
Roca dura	80 a 90	80
Roca blanda	55	55
Trozos de roca	45	40
Terreno vegetal	45	30
Mezcla de arena y arcilla	45	30
Arcilla	40	20
Gravilla	35	30
Arena Fina	30	20

Nota: Tomado de la Norma Chilena 349 (INN, 1999).

3.1.2 Excavación con banquetas

El método de conformación de banquetas consiste en la utilización de plataformas intermedias en donde las excavadoras pasan el material excedente nivel por nivel hasta llegar al volquete. Es usualmente utilizada en los procesos de excavación en minas, pero su

aplicación le permite ser utilizada en zonas urbanas referidas a excavaciones para sótanos (Villanueva, M., s/f). Debe tenerse en cuenta dos aspectos importantes en este método:

- ❖ Cuanto mayor sea la profundidad de excavación se deberá disponer de mayor espacio para la conformación de las banquetas.
- ❖ Por las limitaciones de espacio deberá realizarse un estudio de la zona para poder determinar la ubicación del volquete y los demás equipos de excavación.

Este proceso es similar al del método con rampas hasta llegar a un nivel de fondo debido a que el uso de banquetas se centra en la eliminación del material excedente. El material se retira de manera escalonada, ya que lo hace mediante excavadoras colocadas en diferentes niveles desde la profundidad excavada hasta el volquete en la superficie del terreno.



Figura 6. Proceso de excavación de rampa a banqueta

Fuente: Hurtado, J. (2015)

Este proceso es similar al del método con rampas hasta llegar a un nivel de fondo debido a que el uso de banquetas se centra en la eliminación del material excedente. El material se retira de manera escalonada, ya que lo hace mediante excavadoras colocadas en

diferentes niveles desde la profundidad excavada hasta el volquete en la superficie del terreno.

El traslado de material puede realizarse de dos maneras: La primera consiste en dejar el material excedente en la banqueta superior para que la excavadora lo traslade al siguiente nivel y de la misma forma hasta llevarlo al volquete. La segunda forma consiste en pasar el material directamente entre las excavadoras nivel por nivel hasta llegar a la superficie y luego al volquete. Esta última alternativa suele usarse en excavaciones de mayor profundidad.

3.1.3 Excavación con retiro de material mediante grúas

Este método es utilizado con frecuencia en zonas residenciales o con alta densidad de edificaciones construidas; además, también es utilizado para edificaciones que tendrán una profundidad de excavación muy grande. Esto último se debe a que el cable de la grúa puede extenderse mucho, lo que brinda una ventaja clara sobre otros métodos de eliminación.

Este método consiste en realizar la excavación utilizando cargadores frontales o excavadoras hasta una profundidad en la que ya no pueda retirarse el material usando solo la maquinaria mencionada. Se tiene una grúa que debe estar situada de manera estratégica junto a la excavación para optimizar el flujo de trabajo y que al final del cable puede tener un contenedor grande metálico denominado balde o un cucharón de almeja (figura 2.4b). Si se utiliza un balde, las excavadoras vierten el material de eliminación en él y luego la grúa levanta el material de eliminación, que se coloca en camiones para ser llevado al botadero; por otro lado, si se usa un cucharón de almeja, es la grúa la que recoge el material cortado del suelo para colocarlo en los camiones.

Existen distintos tipos de grúas que pueden ser utilizadas para realizar la eliminación de material. El más utilizado es la grúa torre, debido a que ocupa un espacio muy pequeño en comparación a los otros tipos; sin embargo, también se utilizan grúas móviles. En la figura 2.4a, se observa una excavadora vaciando el material en el balde de una grúa. En la figura

2.5, se aprecia la grúa, que en este ejemplo es móvil, vaciando el material en el camión que lo transportará al botadero. Finalmente, otra ventaja de utilizar grúas es que se puede utilizar para retirar las maquinarias del sótano cuando se requiera.



Figura 7. Vaciado de material en balde de grúa.

Fuente: youtube.com



Figura 8. Grúa recogiendo material utilizando un cucharón de almeja.

Fuente: youtube.com



Figura 9. Eliminación de material mediante grúa.

Fuente: youtube.com

El proceso constructivo de la excavación con retiro de material mediante grúa comprende los siguientes pasos:

1. Delimitar por sobre el terreno los límites de excavación y también indicar los niveles.
2. Cortar el terreno y retirar el material con la excavadora hasta que esta no sea capaz de retirarlo por su cuenta. Esta profundidad es de aproximadamente 3 a 5 m.
3. De acuerdo a los requerimientos del terreno, se debe iniciar la instalación del sostenimiento perimetral.
4. Se instala o coloca en posición la grúa y se continúa con el corte, pero la eliminación del material ahora se realiza mediante el uso de esta y los camiones volquetes.
5. Una vez se llegue al nivel deseado, se retiran los equipos utilizando la grúa.

3.1.4 Excavación con faja transportadora

La faja transportadora es un sistema de transporte continuo formado por una banda continua que se desplaza entre tambores. En el sector de la construcción, se utiliza para el

transporte de material excavado desde un punto de alimentación dentro del proyecto hacia un punto de descarga de material dentro de volquetes fuera del proyecto (Melarín, R.,2021).



Figura 10. Eliminación de material con faja transportadora.

Fuente : youtube.com

Algunos puntos que pueden afectar la productividad de una faja transportadora son:

- ❖ Inicio de montaje de la faja
- ❖ Tiempo de transición entre faja transportadora y rampa
- ❖ Posición de la faja
- ❖ Tamaño de faja dependiendo de las dimensiones y profundidad del proyecto
- ❖ Cantidad de equipos de excavación dependiendo de la cantidad de fajas

Dado que el proyecto seleccionado como tema de investigación cuenta con 5 sótanos y un cuarto de cisterna, se optaría por una faja principal más una transición (ver tabla 2) orientada hacia el centro del proyecto para facilitar la alimentación del material sin interferir en la construcción de las estructuras de sostenimiento. Además, se debe considerar como mínimo dos excavadoras, una excavadora dedicada a la alimentación de material y la segunda se encarga de proveer material a la primera excavadora.

A continuación se detalla el proceso constructivo a seguir en el proceso de excavación con faja transportadora y rampa.

1. Inspeccionar el terreno del proyecto

2. Compatibilizar los planos con el terreno a través de un levantamiento topográfico
3. Acceder mediante una rampa hasta la cota del primer anillo de excavación correspondiente al primer sótano y estabilizar el talud con muros anclados
4. Repetir el procedimiento anterior para el segundo anillo de excavación correspondiente al segundo sótano
5. Realizar el montaje de la faja transportadora por el acceso opuesto a la rampa
6. Retirar la rampa y estabilizar el talud con muros anclados
7. Continuar con la excavación de los demás anillos y eliminar el material vía faja transportadora
8. Retirar las excavadoras con ayuda de una grúa

Tabla 2

Longitud de fajas por número de sótanos

Cantidad de sótanos	Longitud de faja
1 - 4 sótanos	1 faja principal
5 - 8 sótanos	1 faja principal + 1 transición
9 - 12 sótanos	1 faja principal + 2 transición

Nota: Adaptado de Melarín (2021)

3.1.5 Excavación con excavadoras *long reach*

Las excavadoras *long reach* se caracterizan por su brazo delantero particularmente largo, el cual, si bien suele utilizarse para proceso de demolición controlada, también puede usarse en procesos de excavación masiva.

Es importante seleccionar la excavadora *long reach* ideal para el proyecto tal que éste se lleve a cabo de la forma más fluida y eficiente posible; para ello, se deben tomar en cuenta las necesidades del proyecto y las especificaciones técnicas de las excavadoras (potencia,

profundidad máxima, tamaño de balde máximo, entre otros). Por ejemplo, los modelos de la empresa «Avesco Cat» tienen las especificaciones de la figura 2.9.

CAT MODEL	MAXIMUM EXCAVATION DEPTH	MAXIMUM REACH	DIGGING FORCE ISO	THE MOTOR	LOAD CAPACITY KW
320 (SLR)	11,540 mm	15,570 mm	62 kN	Cat C7 1	122
323 (SLR)	11,540 mm	15,570 mm	62 kN	Cat C7 1	129
326 (SLR)	14,580 mm	18,280 mm	61 kN	Cat C7.1	151
330 (SLR)	14,610 mm	18,280 mm	45 kN	Cat C7 1	205

Figura 11. Especificaciones de las excavadoras *long reach* de CAT.

Tomado de Avesco CAT (s.f.)

Particularmente para las excavadoras *long reach* de la empresa «Avesco Cat», de acuerdo a la página web del proveedor, el alcance máximo es el de los modelos 326 y 330, llegando hasta 18.3 m (equivalente 6 sótanos de 3 metros cada uno) de profundidad, con una capacidad de carga de 151 y 205 kW respectivamente. Adicionalmente, otro de los principales proveedores de excavadoras *Long Reach* es «CASE Construction», cuyo modelo CX250D LR tiene un alcance máximo de 14.4 m (47 ft 9 in).

Asimismo, otro criterio importante es el precio de la maquinaria. Debe compararse el precio del modelo de la maquinaria a usar de distintos proveedores y, en base a los parámetros anteriores, se elegirá el equipo adecuado.

El proceso constructivo del método de excavación *Long Reach* consiste en los siguientes pasos:

1. Delimitar zona a excavar en base a los planos y diseños definidos para el proyecto.
2. Construir la rampa de acceso para la excavadora estándar excavando el terreno en la zona establecida. Esta rampa debe considerar el ángulo de reposo del suelo, y debe llegar hasta la profundidad dictada por el método de sostenimiento de taludes (en este caso, hasta la profundidad del primer anillo).

3. Excavar el resto del terreno hasta la profundidad determinada usando una excavadora estándar, y retirar el material a la superficie usando una excavadora Long Reach.
4. Instalar los muros anclados del primer anillo.
5. Excavar hasta la profundidad del segundo anillo con la excavadora estándar, y retirar el material con la excavadora Long Reach.
6. Instalar los muros anclados del siguiente anillo.
7. Repetir los pasos 5, 6 y 7 hasta llegar a la profundidad total del proyecto
8. Luego de finalizar la excavación, extraer la excavadora (la cual se encontraría en el fondo del proyecto) utilizando una grúa.

3.1.6 Método Mixto

De acuerdo con el tipo de material del suelo, la capacidad de la maquinaria y las dimensiones del terreno, las rampas en línea recta tienen un límite para la máxima profundidad a la que permiten excavar. Plantear una segunda rampa para llegar al nivel de excavación final es en algunas ocasiones inconveniente de acuerdo con el tamaño del terreno. Para este proyecto, emplear rampas solamente podría no ser viable para completar la excavación del proyecto, que cuenta con una profundidad mayor a 18 m y un área poco menor a 1000 m².

Melarín y Carbajal (s. f.) plantean dos puntos claves por los que resulta ventajoso emplear un método mixto:

- ❖ Mientras más profundo se permita que baje la rampa, más área queda pendiente de estabilizar. Esto puede causar semanas de retraso solo por la construcción de muros anclados
- ❖ El tiempo que tomaría retirar del proyecto todo el material que conforma la rampa es significativo. Habría que emplear «pasamanos» de excavadoras o carguío de material con torre grúa y canastilla de izaje.

Por ello, se plantea como posibilidad de excavación para el terreno analizado un sistema mixto de excavación con rampa y luego retirar el material de los niveles inferiores mediante una faja transportadora. Un periodo adecuado para la puesta en funcionamiento de la faja transportadora es entre el 2do y 3er anillo de excavación (profundidad de 6 m). Se puede iniciar la instalación de la rampa antes de terminar en este nivel para evitar inconvenientes.

La rampa tendría un ancho de 3.6 m aprox. con una pendiente máxima de 15 % que permite llegar hasta una profundidad de 6 m (2 sótanos). En la segunda etapa se plantea utilizar bandas o fajas transportadoras, se optará por una faja principal más una transición orientada hacia la zona central del proyecto para facilitar la alimentación y eliminación del material sin interferir en la construcción de las paredes ancladas.

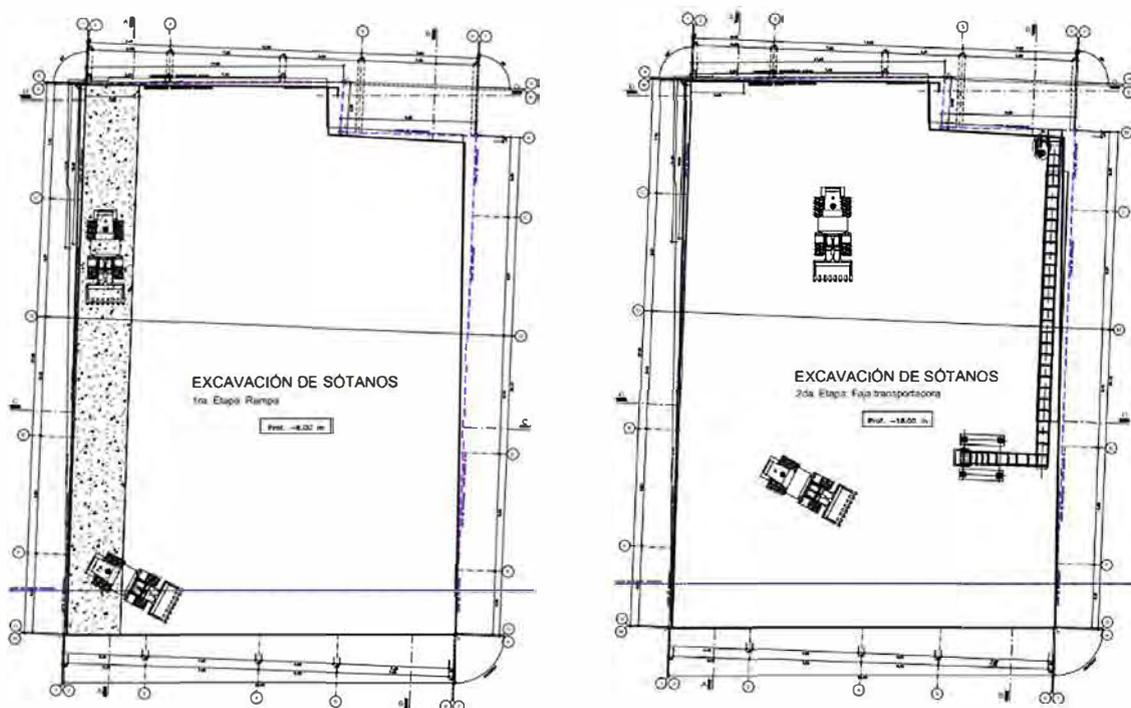


Figura 12. Esquema de rampa (izquierda) y de fajas transportadoras (derecha) para el sistema mixto planteado

Nótese que se excavarían 5674.47 m^3 con rampa y $11\,348.93 \text{ m}^3$ con faja transportadora.

3.2 Medición de costos unitarios

3.2.1 Productividad

De acuerdo con Botero y Álvarez (2004), la productividad es una medida de la eficiencia con la que los recursos son gestionados de manera que un proyecto determinado se termine en un plazo establecido y con un estándar de calidad dado. Entonces se entiende que el concepto de productividad está profundamente relacionado con los conceptos de eficiencia y efectividad; en la figura 13 se visualiza esta relación.

UTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS		OBTENCIÓN DE LAS METAS
Pobre	Alta	
EFFECTIVO PERO INEFICIENTE	EFFECTIVO Y EFICIENTE ÁREA DE ALTA PRODUCTIVIDAD	Alto
INEFFECTIVO E INEFICIENTE	EFICIENTE PERO INEFFECTIVO	Bajo

Figura 13. Relación entre eficiencia, efectividad y productividad.

Tomado de Bravo y Álvarez, 2004

Para una construcción, se diferencian diferentes tipos de productividad de acuerdo al área que se desea analizar. Las utilizadas usualmente en la construcción son las siguientes (Botero y Álvarez, 2004):

- ❖ Productividad de materiales. Se resalta la importancia de analizar los costos de los materiales y evitar desperdicios
- ❖ Productividad de mano de obra. Es uno de los factores más importantes debido a que usualmente define el ritmo de avance del proyecto.

- ❖ Productividad de maquinarias, herramientas y equipos. Se resalta la importancia del uso efectivo de estos, debido a que tiempos muertos refieren a un gasto innecesario que puede ser significativo.

El presente proyecto de investigación se centrará el análisis en la productividad de las maquinarias utilizadas para la excavación. Esto permitirá evaluar de manera aislada la eficiencia y eficacia de utilizar cada tipo de maquinaria y así poder realizar un análisis comparativo entre ellas.

3.2.2. Análisis de Precios Unitarios (APUs)

El análisis de precios unitarios —también llamado análisis de costos— es una herramienta de organización de la información de costo directo que sirve para cuantificar el costo monetario de la ejecución de una unidad de producción (U) en una especialidad constructiva (Pardo, 2021). Se presenta en la tabla 2.2 un ejemplo de Análisis de Precio Unitario. De acuerdo con Suarez (2005), toma en cuenta los materiales, la mano de obra y los equipos a utilizar; pero como se emplean rendimientos y desperdicios promedio en los tres rubros, no puede ser matemáticamente exacto. Ello no quita que el análisis de precios unitarios sea específico a la obra en que se elabora, pues las condiciones particulares también se verán reflejadas en diferentes costos. Un APU es también útil para monitorcar los resultados y el impacto de una mejora aplicada a una cadena de producción; incluso para calibrar y hacer ajustes para futuros diseños (Manrique, 2017).

Cabe resaltar que la suma de las cantidades de aquellos ítems con unidades de hora-hombre (HH) o de hora-máquina (HM) representa la productividad de las personas o de las máquinas en el proceso, expresada en HH/U o HM/U.

Tabla 3

Ejemplo de APU para la instalación de acero en zapata aislada de cimentación

Acero para zapata aislada de cimentación						
Velocidad de la MO	250	kg/día	Costo Unitario (PEN/kg)		4.62	
		Und	Cuadrilla	Cant	P.U	Parcial
MANO DE OBRA						
Capataz		HH	0.10	0.0032	23.08	0.07
Operario		HH	1.00	0.0320	23.45	0.75
Oficial		HH	1.00	0.0320	18.98	0.61
						1.43
MATERIALES						
Separador homologado de plástico para armaduras de cimentaciones de varios diámetros.		Und		0.16	0.39	0.06
Acero en varillas corrugadas, Grado 60 ($f_y=4200$ kg/cm ²), de varios diámetros, según NTP 339.186 y ASTM A706.		kg		1.02	2.99	3.05
Alambre galvanizado para atar, de 1,30 mm de diámetro.		kg		0.004	3.17	0.01
						3.12
EQUIPOS						
Herramientas		% MO		5	1.43	0.07
						0.07

3.3 Método de Ponderación Lineal (Scoring)

El método de ponderación lineal o *scoring* normalizado es, según la teoría del valor, una forma de poder realizar un análisis multicriterio eligiendo entre un conjunto de alternativas la que cause la mayor satisfacción posible. «Este método de decisión aborda situaciones de incertidumbre con pocos niveles de información. Consiste en construir una función de valor para cada una de las alternativas. Es un método compensatorio, y puede resultar dependiente de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones» (Martínez, E., 1997).

En el trabajo de investigación se tratará de elegir la alternativa más eficiente de una forma justificada. Para ello se realizará un análisis multicriterio, teniendo en cuenta los factores expuestos y alternativas anteriormente descritas. Dichos factores se valorarán para cada alternativa expuesta mediante apreciaciones cualitativas traducidas en cifras numéricas entre 1 y 5, contemplando el número 1 la situación más baja o más desfavorable y el número 5 la situación más alta o favorable. Se emplea la siguiente fórmula polinómica:

$$C_i = \frac{20 \sum_{i=1}^n V_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i},$$

donde: $1 < C_i < 100$ es la calificación alcanzada por cada alternativa propuesta, $1 < v_i < 5$ corresponde a las valoraciones de las alternativas y p_i es el coeficiente de ponderación de cada uno de los factores de la alternativa analizada (Puede ser expresada en porcentaje o número). De esta forma, las puntuaciones obtenidas en la calificación, corresponden a un porcentaje de la alternativa ideal (100 %).

3.4 Análisis Funcional

El análisis funcional es una de las fases del análisis de valor en el que se busca que las funciones relativas al usuario describan lo que el objeto del análisis del valor hace o tiene que hacer para satisfacer las necesidades de los clientes durante el ciclo de vida. Para esto se deben hacer preguntas como «¿qué hace?» y «¿para qué sirve el objeto de análisis del valor?» (Instituto Andaluz de Tecnología, 2012). Se puede desarrollar siguiendo las siguientes etapas:

1. Expresión de las funciones
2. Clasificación de funciones
3. Identificación de funciones
4. Caracterización de funciones

5. Ponderación de funciones

Para la ponderación de las funciones se utiliza la matriz necesidades/funciones que, partiendo de la importancia relativa de las necesidades, determina la importancia relativa de cada una de las funciones para satisfacer dichas necesidades.

Tabla 4

Matriz de necesidades y funciones.

Necesidades	Funciones					% importancia necesidad
	F ₁	F ₂	F _n	
N ₁	(2)					(1)
	(3)					
N ₂						
...						
...						
N _m						
Importancia función	(4)					Suma (4)
% importancia función	(5)					Suma (5) = 100

(1) Importancia relativa de cada necesidad.

(2) Contribución de cada una de las funciones para satisfacer cada necesidad (0-5)

(3) Resultados de (1) x (2)

(4) Resultado de suma (3) por columnas.

(5) Resultado de calcular el porcentaje de (4) para cada función

Nota: Tomado de Instituto Andaluz de Tecnología (2012)

3.5. Análisis de Valor

El análisis de valor consiste en obtener y comparar puntajes de cada uno de los criterios de evaluación, y elegir el proceso de excavación adecuado. Los pesos asignados a los criterios y necesidades a utilizar serán los siguientes, donde 0 representa la menor valoración y 5 representa la mayor valoración. La distribución de pesos se asignó en la tabla 5. Se consideró la relación con vecinos como importante pues en la ubicación del proyecto la

municipalidad hace una fiscalización muy estricta y alguna queja podría significar un problema serio.

Tabla 5

Determinación de la valoración de los criterios de análisis

		Criterios					% Importancia necesidad
		Productividad	Costo	Seguridad y Salud	Contaminación ambiental	Contaminación sonora	
Necesidad	Optimización del presupuesto	4	5	3	2	1	5
		20	25	15	10	5	
	Optimización de tiempo	5	3	4	2	1	3
		15	9	12	6		
	Mayor productividad	5	4	3	2	1	4
		20	16	12	8		
	Reducción de riesgo	1	2	5	4	3	2
		2	4	10	8	6	
	Relación de vecinos	1	2	3	4	5	1
		1	2	3	4	5	
Importancia de criterio		58	56	52	36	16	202
% Importancia función		29%	28%	26%	18%	8%	100%

Los criterios de comparación para el análisis de valor tendrán las apreciaciones señaladas en la tabla 6. A continuación, en las subsecciones 3.5.1 a 3.5.5, se definen los criterios de análisis de valor empleados. Nótese que el criterio de profundidad máxima alcanzable tiene apreciación definitiva. Esto significa que los métodos que no cumplan con el criterio no se podrán considerar para el proyecto planteado.

Tabla 6

Apreciaciones de cada criterio de valor evaluado.

Criterio	Apreciación
Contaminación ambiental	18 %
Costo	28 %
Seguridad y salud	26 %
Productividad	29 %
Contaminación sonora	8 %
Profundidad máxima alcanzable	Definitiva

3.5.1. Contaminación ambiental

De acuerdo a la Universidad de Calgary (2021), el impacto ambiental se define como el cambio, ya sea beneficioso o negativo, del entorno generado por actividades, productos o servicios. La evaluación del impacto ambiental se define como la identificación, interpretación, prevención, corrección y valoración de dichos cambios con el objetivo de obtener la conformidad o aprobación del proyecto.

En el presente criterio, se evaluará el impacto ambiental de cada uno de los métodos analizados enfocado en la cantidad de kilogramos de CO₂ equivalente generados a partir del consumo de combustible de cada método. El consumo de combustible de las maquinarias a utilizar, se encuentra en la tabla 7.

Tabla 7

Consumo de combustible de las maquinarias empleadas

Maquinaria	Consumo (L/h)
Excavadora CAT 336 DL	27.08
Camión volquete	10.91
Faja transportadora	0.76
Torre grúa	8.50
Excavadora <i>long reach</i>	35.60

Nota: Elaboración propia con base en los datos de: WPH.net, mvorganizing.org, liebherr.com y cat.com

Asimismo, conociendo que 1 litro de diésel corresponde a 2.68 kg de CO₂, los métodos de excavación serán comparados en base a la cantidad de kg de CO₂ equivalentes que generen por día de trabajo.

3.5.2. Costo

El costo del proceso de eliminación del material es de los primeros aspectos a considerar en el análisis multicriterio de cada alternativa. Se deberá tener en cuenta los costos directos e indirectos de los presupuestos para cada alternativa. Durante el proceso

constructivo se podrá detectar otras partidas que podrán variar los costos en un porcentaje menor. Los factores más importantes en el proceso de excavación son los siguientes:

- ❖ Maquinaria y materiales
- ❖ Mano de obra
- ❖ Volumen de material
- ❖ Tipo de suelo
- ❖ Transporte de material

Para este caso se pretende analizar la incidencia del costo de cada alternativa y asignar un puntaje de acuerdo a qué tan cómodo sea cada alternativa en el aspecto económico. La alternativa con el presupuesto más adecuado será valorada con un puntaje de 5, y se irá reduciendo este valor respecto a la diferencia de precios con respecto a otras alternativas.

3.5.3. Seguridad y salud

La seguridad en la construcción es uno de los aspectos más importantes a tomar en cuenta para la evaluación de la utilización de cualquier método constructivo en toda la fase del proyecto. Es por este motivo que se considera importante considerar este factor como un punto de comparación dentro del análisis de valor para escoger el método más adecuado de excavación de sótanos. A continuación, se muestran los criterios para realizar una evaluación cuantitativa del riesgo.

La magnitud del riesgo se calcula como el producto de la probabilidad y la gravedad de la consecuencia.

$$\textit{Magnitud del riesgo} = \textit{Probabilidad} \times \textit{Consecuencia}$$

La probabilidad de ocurrencia de un peligro podrá clasificarse en baja, media y alta, y se le asignará una valoración de 01 a 05, dependiendo del método de excavación. Asimismo, la consecuencia de la ocurrencia de estos peligros podrán ser daños a las personas y

materiales. Los daños pueden clasificarse en leve (01), moderado (02) y grave (03). Con base en la matriz anterior, se podrá clasificar los riesgos mediante la tabla 8.

Para el criterio de seguridad se tendrá en cuenta los siguientes riesgos:

- ❖ Atmósferas tóxicas
- ❖ Atrapamiento por derrumbe
- ❖ Colisión con otros vehículos/equipos
- ❖ Caídas de objetos o material
- ❖ Ruido
- ❖ Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos

Tabla 8

Clasificación de las magnitudes de riesgo

Magnitud	Riesgo
1	No es significativo
2 - 3	Bajo
4 - 5	Moderado
6 - 8	Medio
9 - 12	Alto
10 - 15	Muy Alto

3.5.4. Productividad

La productividad se define como la medida de eficiencia del uso de recursos respecto a un plazo y calidad determinados. Para la presente, se estudiará la productividad de la maquinaria, por lo que esta se calculará como la suma de las horas-máquina invertidas para excavar un metro cúbico (HM/m³). Esta medida permite comparar el tiempo invertido en diferentes métodos de excavación.

Cada método de excavación, de acuerdo al rendimiento de la maquinaria y al máximo número de cuadrillas que pueden trabajar a la vez, tiene distintos requerimientos de tiempo para completarse. La preparación y el retiro final de la maquinaria empleada también tiene

duraciones distintas en caso se tenga que desinstalar equipos, retirarlos con grúas o si estos se pueden retirar por su cuenta. Asimismo, por ser la excavación uno de los primeros procesos de la construcción, la secuencia constructiva se verá afectada en su totalidad de acuerdo con cómo se vaya haciendo disponible cada etapa, i. e. si se puede empezar con el sostenimiento conforme la maquinaria está operando o solo luego de que ha terminado con todo el nivel, etc.

3.5.5. Contaminación sonora

Debido a la actividad realizada por el hombre a nivel mundial es que el ruido que se genera fue catalogado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como contaminación sonora; por este motivo, actualmente se evidencian los efectos negativos que tienen sobre el ambiente y la calidad de vida de las personas. Una de las actividades que se caracteriza por su gran aporte al ruido en un sitio es la construcción; esto es debido a que se utilizan maquinarias necesarias para realizar el proyecto.

El ruido o Nivel de Potencia Acústica (L_w) es un indicador de la intensidad del sonido intrínseca a un equipo o maquinaria, es decir, este valor proporciona un indicador del ruido que emite el equipo sin importar la distancia a la que se encuentre el medidor y puede ser medido en decibelios (dB) o en decibelios ponderados A (dBA); este último toma en cuenta las longitudes de onda perceptibles por el oído humano. Para la presente investigación, se utilizarán los datos del ruido que producen las máquinas con mayor impacto y que diferencian cada uno de los diferentes métodos de excavación de sótanos presentados anteriormente; estos valores serán presentados en dBA. Además, se analizará si es que tienen algún impacto sobre la salud de los trabajadores tomando como referencia los niveles establecidos por la OMS que identifican potenciales daños a la salud. Los métodos que utilicen maquinaria y equipamiento que emiten mayores niveles de ruido se consideran más desfavorables, y se mencionará aquellos que pueden ser perjudiciales para la salud.

Capítulo 4: Desarrollo de la Investigación

4.1 Presentación de las Características de la Investigación

En la presente investigación, se estudian los cinco criterios del análisis de valor planteados en la sección 3.5 para el caso de una excavación en el proyecto de estudio definido en el capítulo 2.

4.2 Estudio de Contaminación Ambiental Para Cada Método

A partir de los factores de conversión mostrados anteriormente, y asumiendo que 1 día laboral está compuesto por 8 hr, se pueden calcular las emisiones de kg de CO₂ equivalente por día para cada método. Para este cálculo, se deben considerar las maquinarias involucradas en cada método, y la cantidad de las mismas.

4.2.1 Excavación con excavadoras

En primer lugar, se tiene el método de excavación masiva con excavadoras y rampas, que requiere de 2 excavadoras y 6 volquetes; por lo tanto, con base en los consumos de combustible planteados anteriormente, así como de los factores de conversión a kg de CO₂ equivalente, se obtienen las emisiones de la tabla 9.

Tabla 9

Emisiones contaminantes producidas por la excavación con excavadoras

Equipos	Cantidad	Consumo Gasolina (lt/hora)	kgCO ₂ -eq/hr	kgCO ₂ -eq/hr - total	kgCO ₂ -eq/día
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	2	27.08	72.58	320.58	2564.68
Camion volquete 300 HP x 10m ³	6	10.91	29.24		

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Excavación con banquetas

En segundo lugar, se tiene el método de excavación masiva con excavadoras y banquetas, que requiere de 3 excavadoras y de 6 volquetes de 10 m³ de capacidad; por ello, se obtienen los resultados presentados en la tabla 10.

Tabla 10

Emisiones contaminantes producidas por la excavación con banquetas

Equipos	Cantidad	Consumo Gasolina (lt/hora)	kgCO ₂ -eq/hr	kgCO ₂ -eq/hr - total	kgCO ₂ -eq/día
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	3	27.08	72.58	393.17	3145.35
Camion volquete 300 HP x 10m ³	6	10.91	29.24		

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Excavación con retiro de material mediante grúas

En tercer lugar, se tiene el método de excavación masiva con grúa. Este método necesita de 6 camiones volquete de 10 m³ de capacidad, de 2 excavadoras y de 1 torre grúa. Entonces, se tienen los resultados contenidos en la tabla 11.

Tabla 11

Emisiones contaminantes producidas por la excavación con retiro de material mediante grúa

Equipos	Cantidad	Consumo Gasolina (lt/hora)	kgCO ₂ -eq/hr	kgCO ₂ -eq/hr - total	kgCO ₂ -eq/día
Torre grúa	1	8.50	22.78	343.36	2746.92
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	2	27.08	72.58		
Camion volquete 300 HP x 10m ³	6	10.91	29.24		

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Excavación con faja transportadora y rampa

En cuarto lugar, se encuentra el método de excavación masiva con faja transportadora, el cual necesita de 1 faja transportadora, 6 volquetes de 10 m³ de capacidad y 2 excavadoras; por lo tanto, se tienen los resultados contenidos en la tabla 12.

Tabla 12

Emisiones contaminantes producidas por la excavación con faja transportadora y rampa

Equipos	Cantidad	Consumo Gasolina (lt/hora)	kgCO ₂ -eq/hr	kgCO ₂ -eq/hr - total	kgCO ₂ -eq/día
Faja transportadora	1	0.76	2.04	322.62	2580.99
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	2	27.08	72.58		
Camion volquete 300 HP x 10m ³	6	10.91	29.24		

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Excavación con excavadoras *long reach*

Finalmente, en quinto lugar, se tiene el método de excavación masiva con excavadora *long reach*. Este método, requiere de 6 camiones volquete de 10 m³ de capacidad, 1

excavadora convencional, y 1 excavadora Long Reach; por lo tanto, se pueden obtener los valores contenidos en la tabla 13.

Tabla 13

Emisiones contaminantes producidas por la excavación con excavadoras long reach

Equipos	Cantidad	Consumo Gasolina (lt/hora)	kgCO ₂ -eq/hr	kgCO ₂ -eq/hr - total	kgCO ₂ -eq/día
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	1	27.08	72.58		
Excavadora Long Reach 65' CAT 330/ 336	1	35.60	95.41	343.41	2747.28
Camión volquete 300 HP x 10m ³	6	10.91	29.24		

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Método mixto de excavación: Rampa + Faja

Para el cálculo de las emisiones de este método, se usó un promedio ponderado de las emisiones de los métodos: “Excavadora y rampas”, y “Faja transportadora”, utilizando como factor de ponderación el cociente entre el volumen a excavar y el rendimiento para cada uno de los métodos a combinar, como se puede observar en la tabla 14:

Tabla 14

Cálculo de emisión del método mixto

Métodos a combinar	Rendimiento (m ³ /día)	Factor de ponderación	Emisión	Proporción	Emisión
Con Excavadoras con rampa	300	18.915	2564.68	0.400	2574.46
Con Faja Transportadora	400	28.372	2580.99	0.600	
		47.287			

Tabla 15

Resumen de emisiones diarias producidas por cada método de excavación masiva

Métodos de excavación masiva	kg CO ₂ -eq/día	Puntaje
Excavadoras y rampas	2564.68	5
Excavadoras y banquetas	3145.35	0
Faja transportadora	2580.99	5
Retiro de material mediante grúa	2746.92	2
Excavadora <i>long reach</i>	2747.28	2
Método Mixto	2571.67	5

En la tabla 15 se presentan las emisiones diarias correspondientes a cada uno de los métodos de excavación. A partir de los resultados mostrados en la tabla, se puede observar que el método que genera la mayor cantidad de CO₂ es el método de excavación masiva con banquetas, con 3.145 ton de CO₂ al día.

4.3 Cálculo del Costo Para el Proyecto Elegido

Para el cálculo de costos de cada alternativa se utilizó el costo por metro cúbico de excavación. Se utilizó de referencia los APUs de cada una de las alternativas. Para el caso de la excavación por faja y grúas, se utilizaron componentes de costos fijos y se colocaron como parte del precio de la maquinaria. Asimismo, el rendimiento de las cuadrillas y maquinaria están basados en tesis de proyectos inmobiliarios en la zona de San Isidro.

4.3.1 Excavación con excavadoras

Para el método de excavación mediante rampas se usaron 2 excavadoras y 6 volquetes. El precio resultante considerando la cuadrilla es de S/.49.21/m³.

Tabla 16

Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con excavadoras.

Excavación masiva con excavadoras						
Rendimiento	300	m ³ /día		Costo Unitario (PEN/m ³)		49.21
Recursos	Und	Cuadrilla	Cantidad	P.U	Parcial	
Mano de Obra						
Capataz	hh	0.1	0.0027	28.06		0.07
Peon	hh	3	0.0800	18.48		1.48
Operario	hh	3	0.0800	23.38		1.87
			0.1627			3.42
Equipos						
Herramientas manuales	%Mo		5	3.42		0.17
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	hm	2	0.0533	200.00		10.67
Camión volquete 300 HP x 10m ³	hm	6	0.1600	218.43		34.95
			0.2133			45.79

Nota: Elaborado con datos de Santos, J. (2017)

4.3.2 Excavación con banquetas

Tabla 17

Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con banquetas.

Excavación masiva con banquetas						
Rendimiento	400	m ³ /día	Costo Unitario (PEN/m ³)		40.91	
Recursos	Und	Cuadrilla	Cantidad	P.U	Parcial	
Mano de Obra						
Capataz	hh	0.1	0.0020	28.06	0.06	
Peon	hh	3	0.0600	18.48	1.11	
Operario	hh	3	0.0600	23.38	1.40	
			0.1627		2.57	
Equipos						
Herramientas manuales	%Mo		5	2.855	0.13	
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	hm	3	0.0600	200	12.00	
Camión volquete 300 HP x 10m ³	hm	6	0.1200	218.43	26.21	
			0.1800		38.34	

Nota: Elaborado con datos de Santos, J. (2017)

Para el método de excavación mediante rampas se usaron 3 excavadoras y 6 volquetes. El precio resultante considerando la cuadrilla es de S/40.91/ por m³.

4.3.3 Excavación con retiro de material mediante grúas

Tabla 18

Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con retiro de material mediante grúa

Excavación masiva con retiro de material mediante grúas						
Rendimiento	400	m ³ /día	Costo Unitario (PEN/m ³)		65.84	
Recursos	Und	Cuadrilla	Cantidad	P.U	Parcial	
Mano de Obra						
Capataz	hh	0.1	0.0020	28.06	0.06	
Peón	hh	2	0.0400	18.48	0.74	
Operario	hh	1	0.0200	23.38	0.47	
			0.0620		1.26	
Equipos						
Herramientas manuales	%Mo		5	1.26	0.06	
Excavadora CAT Modelo 336DL ME	hm	2	0.0400	143.89	5.76	
Camión volquete 300 HP x 10m ³	hm	6	0.1200	313.70	37.64	
Grúa	hm		0.0200	1055.76	21.12	
			0.1800		64.58	

Nota: Elaborado con datos de Santos, J. (2017)

Para el método de excavación mediante rampas se usaron 2 excavadoras y 6 volquetes y una grúa. El precio resultante considerando la cuadrilla es de S/.65.84/m³.

4.3.4 Excavación con faja transportadora

Tabla 19

Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con faja transportadora

Excavación masiva con retiro de material mediante faja transportadora						
Rendimiento	360	m ³ /día	Costo Unitario (PEN/m ³)		59.55	
Recursos		Und	Cuadrilla	Cantidad	P.U	Parcial
Mano de Obra		Unidad				
Capataz		hh	0.1	0.0022	28.06	0.06
Peón		hh	2	0.0444	18.48	0.74
Operario		hh	1	0.0222	24.00	0.48
				<i>0.0689</i>		1.28
Recursos		Und	Cuadrilla	Cantidad	P.U	Parcial
Equipos						
Herramientas manuales		%Mo		5	1.395	0.07
Excavadora CAT Modelo 336DL ME		hm	2	0.0444	233.80	9.35
Camión volquete 300 HP x 10m ³		hm	6	0.1333	254.87	30.58
Faja transportadora		hm	1	0.0222	913.92	18.21
				<i>0.2000</i>		58.28

Nota: Elaborado con datos de Santos, J. (2017)

Para el método de excavación mediante fajas transportadoras se usaron 2 excavadoras y 6 volquetes y una faja transportadora. El precio resultante considerando la cuadrilla es de S/.59.55/m³.

4.3.5 Excavación con excavadoras *long reach*

Para el método de excavación mediante rampas se usaron una excavadora convencional, una excavadora long reach y 6 volquetes. El precio resultante considerando la cuadrilla es de S/.56.81/m³.

Tabla 20

Análisis de Precio Unitario para la excavación masiva con excavadoras long reach

Excavación masiva con excavadoras long reach						
Rendimiento	350	m ³ /día		Costo Unitario (PEN/m ³)		56.81
Recursos		Und	Cuadrilla	Cantidad	P.U	Parcial
Mano de Obra						
Capataz		hh	0.1	0.0023	28.06	0.06
Peón		hh	3	0.0686	18.48	1.27
Operario		hh	3	0.0686	23.38	1.60
				<i>0.1394</i>		2.93
Equipos						
Herramientas manuales		%Mo		5	2.93	0.15
Excavadora CAT Modelo 336DL ME		hm	1	0.0229	200.00	4.57
EXCAVATOR Long Reach 65' CAT 330/ 336		hm	1	0.0229	840.00	19.20
Camión volquete 300 HP x 10m ³		hm	6	0.1371	218.43	29.96
				<i>0.1829</i>		53.87

Nota: Elaborado con datos de Santos, J. (2017)

4.3.6 Excavación con método mixto

A partir de los análisis de precios unitarios de la excavación con excavadora (tabla 16) y de la excavación con faja transportadora (tabla 19), se calcula un precio unitario para comparar con el resto de precios unitarios.

Tabla 21

Cálculo del precio unitario para el Método Mixto

Método	Costo unitario (PEN/m³)	Cantidad a excavar (m³)	Costo (PEN)
Excavadoras	49.21	5674.47	279240.67
Faja transportadora	59.55	11348.93	675828.78
Total	56.10	17023.4	955069.45

A partir de los análisis de precios unitarios contenidos en las tablas 15 a 19, se resumen los costos y se asigna un puntaje de menor a mayor en la tabla 22.

Tabla 22

Resumen de precios unitarios para cada método de excavación y puntaje de los mismos

Método	Costo (PEN/m³)	Puntaje
Excavadoras	49.21	4
Banquetas	40.91	5
Retiro con grúa	65.84	0
Faja transportadora	59.55	1
Excavadoras long reach	56.81	2
Método mixto	56.10	3

4.4 Estudio de la Seguridad y Salud en Obra

La seguridad y salud en obra es de suma importancia ya que contribuye a disminuir los accidentes laborales, para nuestro trabajo en cuestión de los trabajadores del sector de la construcción. Además, los niveles de ruido y contaminación producidos durante el proceso de excavación y eliminación de material de sótanos generan efectos adversos en las actividades de los vecinos como daños a la propiedad, fatiga, entre otros. Por lo que, plantear aquel método que implique un menor perjuicio hacia los vecinos es lo más recomendable. Para el análisis se emplean los criterios planteados en la norma ISO 45001.

4.4.1 Excavación con excavadoras

En el método de excavadoras se plantea utilizar 2 excavadoras y 6 volquetes lo cual genera una emisión de 2564.68 CO₂/día. Asimismo, la potencia acústica generado por estas máquinas es $2*100.8 + 6*107.4 = 846.0$ db.

Tabla 23

Matriz IPER del método de excavación con excavadoras

Personal Expuesto	Actividad	Categoría de peligro	Descripción del peligro	Riesgo	Situación			Probabilidad				Severidad/Consecuencia	Magnitud del Riesgo	
					Rutina	No rutinaria	Emergencia	Personas expuestas	Procedimiento	Capacitación	Exposición			Probabilidad
Obreros de construcción y personal administrativo	Excavación de sótanos	Atmosférico	Atmósferas tóxicas	Intoxicación por presencia de gases en el interior de la excavación	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Atrapamiento por derrumbe	Asfixia o síndrome del aplastamiento	x	-	-	1	1	1	4	4	3	12
		Físico	Colisión con otros vehículos/equipos	Daño a maquinarias o herramientas	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Caidas de objeto o material	Lesiones graves	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Ruido	Fatiga auditiva, hipoacusia o sordera	x	-	-	1	1	1	2	2	1	2
		Otros riesgos	Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos (ruido, polvo, tránsito de equipos pesados, etc)	Males respiratorios, alergias, daños a la propiedad, fatiga	x	-	-	1	1	1	2	2	1	2
TOTAL											22			

4.4.2 Excavación con banquetas

En el método con banquetas se plantea utilizar 3 excavadoras y 6 volquetes lo cual genera una emisión de 3145.35 CO₂/día. Asimismo, la potencia acústica generado por estas máquinas es $3*100.8 + 6*107.4 = 946.8$ db.

Tabla 24

Matriz IPER del método de excavación con banquetas

Personal Expuesto	Actividad	Categoría de peligro	Descripción del peligro	Riesgo	Situación			Probabilidad				Severidad/Consecuencia	Magnitud del Riesgo	
					Rutina	No rutinaria	Emergencia	Personas expuestas	Procedimiento	Capacitación	Exposición			Probabilidad
Obreros de construcción y personal administrativo	Excavación de sótanos	Atmosférico	Atmósferas tóxicas	Intoxicación por presencia de gases en el interior de la excavación	x	-	-	1	1	1	5	5	2	10
		Físico	Atrapamiento por derrumbe	Asfixia o síndrome del aplastamiento	x	-	-	1	1	1	4	4	3	12
		Físico	Colisión con otros vehículos/equipos	Daño a maquinarias o herramientas	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Caidas de objeto o material	Lesiones graves	x	-	-	1	1	1	2	2	2	4
		Físico	Ruido	Fatiga auditiva, hipoacusia o sordera	x	-	-	1	1	1	4	4	1	4
		Otros riesgos	Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos (ruido, polvo, tránsito de equipos pesados, etc)	Males respiratorios, alergias, daños a la propiedad, fatiga	x	-	-	1	1	1	5	5	1	5
TOTAL											37			

4.4.3 Excavación con retiro de material mediante grúas

En el método de excavación con retiro de material mediante grúas se plantea utilizar 2 excavadoras, 1 camión grúa y 6 volquetes lo cual genera una emisión de 2746.92 CO₂/día. Asimismo, la potencia acústica generado por estas máquinas es $2*100.8 + 1*102.2 + 6*107.4 = 948.2$ dBA. Debido al procedimiento del método en cuestión, se le asigna la mayor probabilidad de ocurrencia de «caídas de objeto o material» ya que el camión grúa elevará el material excavado sobre la zona de trabajo.

Tabla 25

Matriz IPER del método de excavación con retiro de material mediante grúas

Personal Expuesto	Actividad	Categoría de peligro	Descripción del peligro	Riesgo	Situación			Probabilidad				Severidad/Consecuencia	Magnitud del Riesgo	
					Rutinnaria	No rutinnaria	Emergencia	Personas expuestas	Procedimiento	Capacitación	Exposición			Probabilidad
●breros de construcción personal administrativo	Excavación de sótanos	Atmosférico	Atmósferas tóxicas	Intoxicación por presencia de gases en el interior de la excavación	x	-	-	1	1	1	3	3	2	6
		Físico	Atrapamiento por derrumbe	Astixia o síndrome del aplastamiento	x	-	-	1	1	1	4	4	3	12
		Físico	Colisión con otros vehículos/equipos	Daño a maquinarias o herramientas	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Caídas de objeto o material	Lesiones graves	x	-	-	1	1	1	5	5	2	10
		Físico	Ruido	Fatiga auditiva, hipoacusia o sordera	x	-	-	1	1	1	5	5	1	5
		Otros riesgos	Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos (ruido, polvo, tránsito de equipos pesados, etc.)	Males respiratorios, alergias, daños a la propiedad, fatiga	x	-	-	1	1	1	4	4	1	4
TOTAL													39	

4.4.4 Excavación con faja transportadora

En el método de excavadoras se plantea utilizar 2 excavadoras, 1 faja transportadora y 6 volquetes lo cual genera una emisión de 2580.99 CO₂/día. Asimismo, la potencia acústica generado por estas máquinas es $2*100.8 + 1*65.0 + 6*107.4 = 911.0$ dBA.

Tabla 26

Matriz IPER del método de excavación con faja transportadora

Personal Expuesto	Actividad	Categoría de peligro	Descripción del peligro	Riesgo	Situación		Probabilidad				Severidad/Consecuencia	Magnitud del Riesgo		
					Rutina	No rutinaria	Emergencia	Personas expuestas	Procedimiento	Capacitación			Exposición	Probabilidad
Obreros de construcción personal administrativo	Excavación de sótanos	Atmosférico	Atmósferas tóxicas	Intoxicación por presencia de gases en el interior de la excavación	x	-	-	1	1	1	2	2	4	
		Físico	Atrapamiento por derrumbe	Asfixia o síndrome del aplastamiento	x	-	-	1	1	1	4	4	3	12
		Físico	Colisión con otros vehículos/equipos	Daño a maquinarias o herramientas	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Caidas de objeto o material	Lesiones graves	x	-	-	1	1	1	3	3	2	6
		Físico	Ruido	Fatiga auditiva, hipoacusia o sordera	x	-	-	1	1	1	3	3	1	3
		Otros riesgos	Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos (ruido, polvo, tránsito de equipos pesados, etc)	Males respiratorios, alergias, daños a la propiedad, fatiga	x	-	-	1	1	1	3	3	1	3
TOTAL											30			

4.4.5 Excavación con excavadoras long reach

En el método con excavadoras long reach se plantea utilizar 1 excavadora long reach, 1 excavadora y 6 volquetes lo cual genera una emisión de 2747.28 CO₂/día. Asimismo, la potencia acústica generado por estas máquinas es $2*100.8 + 1*100.8 + 6*107*4 = 946.8$ dBA. Debido al procedimiento del método en cuestión, se le asigna la mayor probabilidad de ocurrencia de «*atrapamiento por derrumbe*» ya que la maquinaria long reach trabaja al borde de la excavación.

Tabla 27

Matriz IPER del método de excavación con long reach

Personal Expuesto	Actividad	Categoría de peligro	Descripción del peligro	Riesgo	Situación		Probabilidad				Severidad/Consecuencia	Magnitud del Riesgo		
					Rutina	No rutinaria	Emergencia	Personas expuestas	Procedimiento	Capacitación			Exposición	Probabilidad
Obreros de construcción personal administrativo	Excavación de sótanos	Atmosférico	Atmósferas tóxicas	Intoxicación por presencia de gases en el interior de la excavación	x	-	-	1	1	1	4	4	2	8
		Físico	Atrapamiento por derrumbe	Asfixia o síndrome del aplastamiento	x	-	-	1	1	1	5	5	3	15
		Físico	Colisión con otros vehículos/equipos	Daño a maquinarias o herramientas	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Caidas de objeto o material	Lesiones graves	x	-	-	1	1	1	4	4	2	8
		Físico	Ruido	Fatiga auditiva, hipoacusia o sordera	x	-	-	1	1	1	4	4	1	4
		Otros riesgos	Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos (ruido, polvo, tránsito de equipos pesados, etc)	Males respiratorios, alergias, daños a la propiedad, fatiga	x	-	-	1	1	1	4	4	1	4
TOTAL											41			

4.4.6 Excavación con método mixto

En el método mixto se genera una emisión de 2574.46 CO₂/día. Asimismo, la potencia acústica generada por estas máquinas es 911.0 dBA.

Tabla 28

Matriz IPER del método mixto

Personal Expuesto	Actividad	Categoría de peligro	Descripción del peligro	Riesgo	Situación			Probabilidad				Severidad/Consecuencia	Magnitud del Riesgo	
					Rutinario	No rutinario	Emergencia	Personas expuestas	Procedimiento	Capacitación	Exposición			Probabilidad
Obreros de construcción personal administrativo	Excavación de sótanos	Atmosférico	Atmósferas tóxicas	Intoxicación por presencia de gases en el interior de la excavación	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Atrapamiento por derrumbe	Asfixia o síndrome del aplastamiento	x	-	-	1	1	1	4	4	3	12
		Físico	Colisión con otros vehículos/equipos	Daño a maquinarias o herramientas	x	-	-	1	1	1	1	1	2	2
		Físico	Caidas de objeto o material	Lesiones graves	x	-	-	1	1	1	3	3	2	6
		Físico	Ruido	Fatiga auditiva, hipoacusia o sordera	x	-	-	1	1	1	3	3	1	3
		Otros riesgos	Efecto de la excavación en las actividades de los vecinos (ruido, polvo, tránsito de equipos pesados, etc.)	Males respiratorios, alergias, daños a la propiedad, fatiga	x	-	-	1	1	1	3	3	1	3
TOTAL												28		

A partir de los resultados obtenidos en las matrices de seguridad, se puntúa a los métodos de mayor a menor seguridad para el personal en obra y los vecinos en la tabla 29.

Tabla 29

Resumen de riesgo para cada método de excavación y puntaje de los mismos

Método de excavación	Riesgo	Puntaje
Excavadoras	22	5
Mixto	28	4
Banquetas	37	2
Retiro con grúa	39	1
Faja transportadora	30	3
Excavadoras long reach	41	0

4.5 Estudio Sobre Productividad

A partir de los Análisis de Precios Unitarios de cada método —presentados anteriormente en la sección 4.3 en las tablas 15 a 19—, se calcula la productividad de cada método. Estos análisis de precios unitarios consideran las horas máquina de cada uno de los métodos de excavación. Debido a que la productividad representa el tiempo invertido para

una unidad de producción, en este caso un metro cúbico excavado, una menor productividad implica una menor inversión de recursos. Por ello, se asigna un puntaje mayor a las alternativas de banqueta, excavadora, retiro con grúa y faja transportadora, pues son estas las alternativas con menos inversión de tiempo de máquinas necesaria.

Para el caso del método mixto, se ponderó la productividad

Tabla 30

Resumen de productividad para cada método de excavación y puntaje de los mismos

Método de excavación	Productividad de la maquinaria (HM/m³)	Puntaje
Excavadoras	0.2133	2
Banquetas	0.1800	5
Retiro con grúa	0.1800	5
Faja transportadora	0.1800	5
Excavadoras long reach	0.1829	4
Método mixto	0.1911	3

4.6 Estudio Sobre Contaminación Sonora

Para el estudio se consideraron fuentes cuyas base de datos o mediciones contemplan sólo determinadas marcas o modelos de cada máquina. Esto representa un limitante debido a que diferentes marcas y modelos de una misma máquina pueden producir niveles diferentes de ruido. Sin embargo, se consideran estos datos como representativos para el proyecto. Asimismo, las mediciones presentadas son valores promediados de mediciones *in situ* presentadas por Max Glisser (2016) con por lo menos 3 mediciones realizadas; existen algunas excepciones que se identifican con un «*». De acuerdo con la OMS, el nivel umbral del dolor y que puede causar daños a largo plazo es de 130 dBA, y el nivel a partir del cual se recomienda utilizar protección es de 85 dBA.

4.6.1 Excavación con excavadoras

El equipo diferenciador y principal de este método son las excavadoras y camiones tolva. En la tabla 31 se muestra el ruido que producen.

Tabla 31

Ruido para el método de excavación con excavadoras

Maquinaria	Potencia acústica Lw (dBA)	Número de máquinas utilizado	Potencia acústica × Número de máquinas	¿Requiere protección auditiva?
Excavadora	100.8	2	201.6	Sí
Camión Tolva	107.4	6	644.4	

4.6.2 Excavación con banquetas

Este método es bastante similar al método con excavadoras, con la diferencia de que en vez de utilizar la rampa, se utilizan banquetas, por lo que se representa como maquinaria significativa también la excavadora y el camión tolva o volquete.

Tabla 32

Ruido para el método de excavación con banquetas

Maquinaria	Potencia acústica Lw (dBA)	Número de máquinas utilizado	Potencia acústica × Número de máquinas	¿Requiere protección auditiva?
Excavadora	100.8	3	302.4	Sí
Camión Tolva	107.4	6	644.4	

4.6.3 Excavación con retiro de material mediante grúas

En este método, la presencia de la grúa la diferencia de los dos anteriores. En la tabla 33 se muestra la potencia acústica para estas.

Tabla 33

Ruido para el método de excavación con retiro de material mediante grúas

Maquinaria	Potencia acústica Lw (dBA)	Número de máquinas utilizado	Potencia acústica × Número de máquinas	¿Requiere protección auditiva?
Excavadora	100.8	2	201.6	Sí
Camión Tolva	107.4	6	644.4	
Camión grúa	102.2	1	102.2	

4.6.4 Excavación con faja transportadora

Además de utilizar la faja transportadora, se utilizan excavadoras y volquetes para este método de excavación.

Tabla 34

Ruido para el método de excavación con retiro de material mediante faja transportadora

Maquinaria	Potencia acústica Lw (dBA)	Número de máquinas utilizado	Potencia acústica × Número de máquinas	¿Requiere protección auditiva?
Excavadora	100.8	2	201.6	
Camión Tolva	107.4	6	644.4	Sí
Faja transportadora	65*	1	65	

Nota: El dato marcado con * fue tomado de Amela (2016)

4.6.5 Excavación con excavadoras *long reach*

Debido a que las excavadoras *long reach* tienen una potencia similar a las excavadoras convencionales grandes, se empleó el dato de esta última como representativo. El resultado se presenta en la tabla 35.

Tabla 35

Ruido para el método de excavación con excavadoras long reach

Maquinaria	Potencia acústica Lw (dBA)	Número de máquinas utilizado	Potencia acústica × Número de máquinas	¿Requiere protección auditiva?
Excavadora <i>long reach</i>	100.8	2	201.6	Sí
Camión tolva	107.4	6	644.4	

En resumen, de los métodos estudiados es posible realizar una evaluación ponderada para escoger el más desfavorable en tanto a ruido. Para esto, se multiplican los valores de la cantidad de máquinas por su potencia acústica. El resultado no es la potencia acústica total que emitirán juntas, si no una representación numérica, en la que el mayor resultado se manifiesta en el método más desfavorable en tanto a contaminación sonora. Además, a cada

método le corresponde una calificación acústica, en la que se le asigna 5 al más favorable y las demás tienen una calificación proporcional.

En la tabla 36 se muestran los resultados ordenados. Para el caso de la excavación con retiro de material mediante grúas, debido a que la diferencia respecto a los métodos de excavación con banquetas y con excavadoras *long reach* es muy pequeña, se considera la misma nota.

Tabla 36

Ruido total producido por cada método

Método de excavación	Potencia acústica × Número de máquinas	Calificación acústica
Con excavadoras	846.0	5
Con banquetas	946.8	2
Con faja transportadora	911.0	4
Con retiro de material mediante grúa	948.2	2
Con excavadoras <i>long reach</i>	946.8	2
Método mixto	911.0	4

4.7 Profundidad máxima alcanzable

Se plantean las restricciones a la profundidad alcanzable para cada método en la siguiente lista:

- ❖ La excavación con excavadoras está limitada por la máxima profundidad que se puede alcanzar con una rampa lineal de 15 % de pendiente en el terreno.
- ❖ La excavación con banquetas está limitada por el ángulo de reposo del terreno, para lo cual se considerará la tabla 1.
- ❖ La excavación con grúa está restringida por el alcance del cable de izaje de la misma
- ❖ La excavación con faja transportadora está restringida por el espacio disponible para la instalación de las mismas.
- ❖ La excavación con excavadoras *long reach* está restringida por el alcance de su brazo.

A partir de estas restricciones, se evalúa si las profundidades máximas son suficientes para el proyecto en estudio. El resultado se presenta en la tabla

Tabla 37

Evaluación de la profundidad máxima alcanzable para cada método

Método de excavación	Profundidad máxima alcanzable (m)	¿Es suficiente?
Con excavadoras	6.00	No
Con banquetas	6.00	No
Con faja transportadora	Al menos 20 (2 tramos)	Sí
Con retiro de material mediante grúa	Al menos 20	Sí
Con excavadoras <i>long reach</i>	18.50	Sí
Método mixto	Al menos 26 (2 tramos+grúa)	Sí

4.8 Análisis de Alternativas y Restricciones del Caso de Estudio

Teniendo cuantificado los criterios utilizados para el análisis de valor se debe calificar cada una de las alternativas para cada criterio seleccionado. También debe tener el peso de cada criterio. Para calcular este factor de ponderación se utilizó como herramienta de ayuda una adaptación a la matriz necesidades/funciones vista en la tabla 5. Con base en ello, se obtuvo los pesos de cada criterio vistos en la tabla 6.

Para la valoración de las alternativas se tomó en cuenta en los criterios de costos, productividad, contaminación ambiental y sonora un puntaje por orden inverso, es decir que el mayor valor obtenido en ese criterio era calificado con uno y el menor de ellos con uno. Para el caso del criterio de seguridad esto no fue necesario y se trabajó en un orden normal. Adicionalmente se debe tener en cuenta que cuando dos o más resultados coinciden o llegan a ser muy parecidos entonces se les asignará el mismo puntaje y la siguiente alternativa será calificada con el puntaje inmediato inferior. Los resultados del análisis multicriterio de las alternativas se muestran en la tabla 38.

Utilizando el análisis *scoring* se obtiene que la alternativa más conveniente y por tanto la primera en la que debería pensarse es el método de excavación con banquetas, seguida de la excavación simple, la excavación con sistema mixto, la excavación con faja transportadora, excavación *long reach* y finalmente la excavadora con grúa.

Tabla 38

Ponderación de puntajes en cada criterio de valor para comparar los métodos de excavación presentados

Métodos de excavación	Ponderación de criterios					Puntaje total
	Costo	Productividad	Seguridad	Contaminación ambiental	Contaminación sonora	
	41	28	25	7	13	
Desempeño (0 a 5)						
Con excavadoras	4	1	5	5	5	72.9
Con banquetas	5	5	2	0	2	74.4
Con grúa	0	5	1	2	2	35.9
Con faja transportadora	1	5	3	5	4	59.9
Con excavadoras <i>long reach</i>	2	4	0	2	2	41.2
Mixto	3	3	4	5	4	68.9

No obstante, resta analizar el criterio definitorio para la aplicación de los métodos al proyecto, que es evaluar si la profundidad máxima alcanzable es suficiente para emplear el método citado. Solo los métodos de grúa, faja transportadora, excavadora *long reach* y mixto cumplen con la profundidad requerida.

Por ello, se plantea como la mejor alternativa un sistema mixto de rampa y faja transportadora.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Con base en la información analizada para comparar los distintos métodos de excavación de sótanos presentados, se obtienen las siguientes conclusiones:

- ❖ El método de ponderación lineal (scoring) es un procedimiento de análisis multicriterio adecuado para el caso de comparación debido a su simplicidad y a que no requiere demasiada información de los criterios. Este punto resulta conveniente dado que los resultados con los que se evaluaron las alternativas son muy generales y carecen de un control y monitoreo propio.
- ❖ El método más ventajoso de excavación es el de excavadoras simples con rampas. Es el método más seguro, con la menor inversión de tiempo de la maquinaria por metro cúbico de excavación y el menos ruidoso. El siguiente método más ventajoso es el de excavación con banquetas. Entre los tres otros métodos de excavación, que permiten llegar a grandes profundidades, el método más ventajoso es el de faja transportadora.
- ❖ La restricción de profundidad del método de excavación simple causa que no permita acceder a niveles más allá del tercer anillo de muros anclados. Debido a esta restricción, se debe plantear un sistema mixto.
- ❖ El método de la faja transportadora mostró el mejor rendimiento entre las alternativas de gran profundidad evaluadas, por lo que es el ideal para conformar el sistema mixto necesario para la excavación del proyecto estudiado.
- ❖ Se recomienda emplear una combinación de los métodos de excavación masiva con excavadoras, para excavar entre el nivel del suelo y el segundo sótano, y con faja transportadora, más allá del segundo sótano.
- ❖ Cuando las dimensiones sean suficientes, se recomienda considerar los métodos de excavación simple con rampa y excavación con banquetas como los más óptimos.

Bibliografía

- Amela Felipe, E. (2016). Diseño de una cinta transportadora en una instalación de carga automática de coque. Repositori.uji.es. <http://hdl.handle.net/10234/165321>
- Avesco CAT. (s.f.). Long Reach Excavator: How to choose the right one. Recuperado el Octubre de 2021, de <https://www.avesco-cat.com/long-reach-excavator-how-to-choose-the-right-one>
- Birgitta Berglund, Lindvall, T., Organisation Mondiale De La Santé, & Center For Sensory Research. (1998). Community noise. Center For Sensory Research.
- Botero, L. y Álvarez, M. (2004). Guía de mejoramiento continuo para la productividad en la construcción de proyectos de vivienda (Lean construction como estrategia de mejoramiento) octubre, noviembre, diciembre. REVISTA Universidad EAFIT, 40(136), 50–64. <https://repository.cafit.edu.co/bitstream/handle/10784/17183/document%20-%202020-08-15T162704.591.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Cantú, A., López, M. y Peirone, P. (2018). *Análisis de los Factores que afectan la Productividad de Obras Civiles*.
- Caterpillar, «Long Reach Excavation: 340 Long Reach,» 2021. [En línea]. Available: https://www.cat.com/en_GB/products/new/equipment/excavators/long-reach-excavation/15969892.html.
- ConstroFacilitator. (2020). *Long Reach Excavator models used in construction*. Recuperado el 15 de octubre de 2021, de <https://www.constrofacilitator.com/long-reach-excavator-models-used-in-construction/>
- Constructivo. (2019). *¿Qué tipos de suelo tiene Lima y qué tan seguro es construir sobre ellos?* Recuperado el 15 de octubre de 2021, de <https://constructivo.com/noticia/que-tipos-de-suelos-tiene-lima-y-que-tan-seguro-es-construir-sobre-ellos-1553217144>

- Glisser, M. (2016). Comparación de niveles de potencia acústica para maquinarias medidas en terreno por Control Acústico Ltda. y niveles establecidos por la Norma Británica BS5228. En XII Seminario Internacional de Acústica INACAP SEMACUS.
- Guio, J. & Cayllahua, D. (2019). Análisis de los métodos de eliminación de material para construcción de sótanos en Proyectos que presentan suelo granular en Lima Metropolitana. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima.
- Hurtado, J. (2015). Soluciones Geotécnicas en Estabilidad de Taludes [Presentación para el curso de Geotecnia sección de post grado] Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/loghan4390/soluciones-geotcnicas-en-estabilidad-de-taludes>
- Instituto Andaluz de Tecnología (2012). *La respuesta está en la innovación*. España.
- Instituto Nacional de Normalización - INN [Chile]. (1999). *Norma Chilena 349: Construcción - Disposiciones de Seguridad en Excavación*.
- ISOTools Excellence, «Dirección por Objetivos,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.isotools.org/soluciones/personas/direccion-por-objetivos/>.
- Liebherr, «Fuel savings calculator,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.liebherr.com/cn/sgp/specials/fuel-savings-calculator/tool/calculator.html#page=3&catid=8&id=LR-1100&v1=&v2=&v3=&ca=1&cu=EUR>.
- Manrique, Y. (2017). *Diseño de un modelo de gestión para mejorar la rentabilidad mediante el incremento de la productividad y el control de los costos en proyectos de construcción* [Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma]. <https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1392/YMANRIQUER.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Martínez, E. y Escudey, M. (1997), Evaluación y decisión multicriterio: reflexiones y experiencias. Santiago, Chile: Editorial Universidad de Santiago de Chile.

Melarán, R., y Carbajal, G. (s. f.). Fajas Transportadoras: Una solución a excavaciones profundas. *Costos*.

MVOrganizing. (2021). *How much fuel does a dump truck use?* Disponible en:

<https://www.mvorganizing.org/how-much-fuel-does-a-dump-truck-use/#:~:text=Dump%20trucks%20average%205%20to,cut%20into%20your%20profit%20margins..>

Pardo, M. (2021). *Precio unitario en construcción. ¿Qué es y cómo se elabora?*

<https://marcelopardo.com/precio-unitario-en-construccion-que-es-y-como-se-construye/>

Santos, J. (2017). Aplicación del método de izaje en la eliminación de material excedente para mejorar la productividad en los procesos de excavación en sótanos para edificaciones en el distrito de San Isidro. Lima.

Suarez, C. (2005). *Costo y Tiempo en la Edificación*. Editorial Limusa.

Software DELSOL, «Productividad,» [En línea]. Disponible en

<https://www.sdelsol.com/glosario/productividad/>.

Tavella, M., Miropolsky, A., y Mancra, R. (2014). Estudio Comparativo de Métodos Multicriterio para el análisis de la Localización Sustentable de Parques Industriales Regionales. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 1(1),

41. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/6968>

Villanueva, M. (s/f). *Excavación de taludes utilizando banquetas*. Instituto de la construcción y Gerencia.

University of Calgary. (2021). *Environmental impact*. Obtenido de

https://energyeducation.ca/encyclopedia/Environmental_impact