



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE LAS DESVIACIONES EN RENDIMIENTOS DE
ACTIVIDADES EN PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

FABIOLA CAROLINA GONZÁLEZ ARRIAGADA

PROFESOR GUÍA:
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO POLANCO CARRASCO
WILLIAM WRAGG LARCO

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniera Civil
POR: Fabiola González Arriagada
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Edgardo González Lizama

ANÁLISIS DE LAS DESVIACIONES EN RENDIMIENTOS DE ACTIVIDADES EN PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

La construcción de proyectos de ingeniería civil requiere una comprensión profunda de las desviaciones estándar en los rendimientos de las actividades. Esta comprensión se dificulta porque la desviación estándar no es intuitiva. Es más intuitivo el concepto de variabilidad, que, aunque no corresponde a un concepto estadístico propiamente tal, se puede entender como la diferencia entre un rendimiento determinado y un rendimiento medio, dividido por el rendimiento medio.

Ferrada (2019) define la variabilidad de modo análogo para la duración de actividades y con dicha definición, demuestra que las variabilidades calculadas a partir de los datos reales de algunas actividades de la ingeniería civil son similares a las que Rodríguez (2016) levantó a partir del juicio de expertos.

En la presente memoria se sigue un recorrido equivalente al de Ferrada (2019) para calcular las variabilidades de los rendimientos de actividades, desarrollando un ejemplo particular con datos de la ejecución del sostenimiento de túneles interestación del Proyecto de la Línea 6 del Metro de Santiago.

La apuesta es que las variabilidades de los rendimientos de actividades deben ser similares a las variabilidades de la duración de actividades si es que las actividades en cuestión son similares. Dado que Ferrada (2019) también trabaja con datos de túneles interestación del Proyecto de Línea 6 del Metro de Santiago, es posible entonces comprobar lo expuesto. Cabe destacar que la base de datos utilizada en la presente memoria es una base de datos mayor.

El desarrollo de la tesis concluye en que para el caso de estudio, la ejecución del sostenimiento de los túneles interestación del Proyecto de Línea 6 del Metro de Santiago, las variabilidades de los rendimientos de actividades son similares las variabilidades de la duración de actividades.

*A mi familia por su incondicional
apoyo y amor. Gracias por estar
siempre a mi lado.*

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	2
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	2
1.3	ALCANCES	2
1.4	METODOLOGÍA	3
1.4.1	<i>Estado del Arte</i>	3
1.4.2	<i>Análisis de datos</i>	3
1.4.3	<i>Aplicación metodología estadística</i>	3
1.4.4	<i>Estudio Paramétrico</i>	3
1.4.5	<i>Análisis de Resultados</i>	4
1.5	RESULTADOS ESPERADOS	4
2	MARCO CONCEPTUAL	5
2.1	DIRECCIÓN DE PROYECTOS	5
2.1.1	<i>Definición</i>	5
2.1.2	<i>Procesos de la dirección de proyectos</i>	5
2.2	RENDIMIENTOS	7
2.2.1	<i>Definición</i>	7
2.2.2	<i>Factores de afectación en los rendimientos</i>	7
2.2.3	<i>Métodos de estimación</i>	10
2.3	EVALUACIÓN ESTADÍSTICA	11
2.4	POBLACIÓN	11
2.4.1	<i>Muestra</i>	11
2.4.2	<i>Medidas de Tendencia Central</i>	12
2.4.3	<i>Medidas de variación</i>	12
2.5	DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD	13
2.5.1	<i>Distribución Normal</i>	14
2.5.2	<i>Distribución Normal Estándar</i>	14
2.5.3	<i>Distribución t de Student</i>	16
2.5.4	<i>Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS)</i>	16
2.6	MÉTODO PROPUESTO POR ROBERTO FERRADA	17
2.6.1	<i>Introducción analógica</i>	17
2.6.2	<i>Análisis Estadístico de la Estimación de Rendimientos de Actividades</i>	19
2.7	DESVIACIONES DE LOS RENDIMIENTOS DE ACTIVIDADES ANALIZANDO DATOS REALES	20
3	ESTUDIO ESTADÍSTICO	23
4	CÁLCULO DE DESVIACIONES DE ACTIVIDADES	25
4.1	GRAVAS	25
4.2	FINOS	27
5	RESULTADOS APLICACIÓN DEL MÉTODO	29
5.1	GRAVAS	29

5.2	EN FINOS	30
6	VARIABILIDAD DE LOS RENDIMIENTOS.....	32
7	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	35
8	CONCLUSIONES	37
	BIBLIOGRAFÍA	38
	ANEXOS	39
	ANEXO A: TABLAS DE DISTRIBUCIONES	39
	ANEXO B: FACTOR ESTADÍSTICO T	41
	ANEXO C: MÉTODO Z-SCORES	42
	ANEXO D: DATOS EJECUCIÓN SOSTENIMIENTO TÚNEL DE METRO.....	45
	ANEXO E: PRUEBA DE KOLMOROV-SMIRNOV	51
	ANEXO F: HISTOGRAMAS DE ACTIVIDADES PROYECTO DE TÚNELES	53

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Valor coeficiente estadístico t según nivel de confianza para número de muestras ≥ 30	18
Tabla 4-1: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1 [m] para gravas	25
Tabla 4-2: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1,5 [m] para gravas	26
Tabla 4-3: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1,0 [m] en gravas	26
Tabla 4-4: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1,5 [m] en gravas	27
Tabla 4-5: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1 [m] en finos	27
Tabla 4-6: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1,5 [m] en finos.....	27
Tabla 4-7: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1 [m] en finos.....	28
Tabla 4-8: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1,5 [m] en finos.....	28
Tabla 5-1: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1 [m] en gravas	29
Tabla 5-2: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1,5 [m] en gravas	29
Tabla 5-3: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1 [m] en finos.....	30
Tabla 5-4: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1,5 [m] en finos.....	30
Tabla 6-1: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en gravas. Nivel de confianza 80%.....	32
Tabla 6-2: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en gravas. Nivel de confianza 90%.....	32
Tabla 6-3: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en gravas. Nivel de confianza 80%.....	32
Tabla 6-4: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en gravas. Nivel de confianza 90%.....	33
Tabla 6-5: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en finos. Nivel de confianza 80%.....	33
Tabla 6-6: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en finos. Nivel de confianza 90%.....	33
Tabla 6-7: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en finos. Nivel de confianza 80%.....	34
Tabla 6-8: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en finos. Nivel de confianza 90%.....	34
Tabla 7-1: Variabilidad promedio de rendimientos de actividades para un nivel de confianza del 80%	36
Tabla 7-2: Variabilidad promedio de rendimientos de actividades para un nivel de confianza del 90%	36
Tabla A-0-1: Tabla Distribución Normal	39
Tabla A-0-2: Tabla Distribución T de Student.....	40
Tabla B-0-1: Valores factor estadístico t	41

Tabla C-0-1: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades en gravas	42
Tabla C-0-2: Z-scores de los valores de cada actividad, caso avance de 1 [m] en gravas	43
Tabla D-0-1: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1,0 [m], en gravas.....	45
Tabla D-0-2: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1,0 [m], en gravas.....	45
Tabla D-0-3: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1,0 [m], en gravas.....	45
Tabla D-0-4: Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1,0 [m], en gravas	45
Tabla D-0-5: Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1,0 [m], en gravas	46
Tabla D-0-6: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1,0 [m], en gravas	46
Tabla D-0-7: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1,5 [m], en gravas.....	46
Tabla D-0-8: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1,5 [m], en gravas.....	46
Tabla D-0-9: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1,5[m], en gravas	47
Tabla D-0-10 : Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1,5 [m], en gravas	47
Tabla D-0-11: : Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1,5 [m], en gravas	47
Tabla D-0-12: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1,5 [m], en gravas	47
Tabla D-0-13: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1 [m], en finos.....	47
Tabla 0-14: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1 [m], en finos.....	48
Tabla D-0-15: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1 [m], en finos.....	48
Tabla D-0-16: Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1 [m], en finos.....	48
Tabla D-0-17: Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1 [m], en finos	48
Tabla D-0-18: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1 [m], en finos.....	48
Tabla D-0-19: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1,5 [m], en finos.....	49
Tabla D-0-20: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1,5 [m], en finos	49
Tabla D-0-21: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1,5 [m], en finos.....	49
Tabla D-0-22: Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1,5 [m], en finos.....	50

Tabla D-0-23: Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1,5 [m], en finos	50
Tabla D-0-24: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1,5 [m], en finos.....	50
Tabla E-0-1: Ejemplo de Resultado Prueba Kolmorov-Smirnov utilizando el Software IBM SPSS Statistics 20	52
Tabla E-0-2: Resultados Prueba Kolmorov-Smirnov para actividades de avance 1,5 [m], en gravas.....	52
Tabla E-0-3: Resultados Prueba Kolmorov-Smirnov para actividades de avance 1 [m], en finos.....	52

Índice de Figuras

Figura 2-1: Curva de distribución normal	14
Figura 2-2: Conversión de distribución	15
Figura 2-3: a) Curva normal estándar, b) t de Student para $v=5$, c) t de Student para $v=1$	16
Figura 2-4: Distribución normal resistencia a la compresión del hormigón	17
Figura 2-5: Curva de distribución normal del rendimiento de una actividad	19
Figura 2-6: Sección Túnel Interestación tipo Herradura (medidas en mm)	21
Figura 2-7: Sección Túnel Interestación tipo con Contrabóveda (medidas en mm)	21
Figura F-0-1: Histograma excavación avance 1,0 [m], gravas	53
Figura F-0-2: Histograma perfilado marco avance 1,0 [m], gravas.....	53
Figura F-0-3: Histograma sello avance 1,0 [m], gravas.....	54
Figura F-0-4: Histograma mallado Avance 1,0 [m], gravas	54
Figura F-0-5: Histograma instalación de marco Avance 1,0 [m], gravas	55
Figura F-0-6: Histograma hormigón proyectado Avance 1,0 [m], gravas	55
Figura F-0-7: Histograma excavación avance 1,5 [m], finos.....	56
Figura F-0-8: Histograma perfilado avance 1,5 [m], finos.....	56
Figura F-0-9: Histograma sello avance 1,5 [m], finos	57
Figura F-0-10: Histograma mallado avance 1,5 [m], finos.....	57
Figura F-0-11: Histograma Instalación de marco avance 1,5 [m], finos	58
Figura F-0-12: Histograma hormigón proyectado avance 1,5 [m], finos.....	58

1 Introducción

1.1 Motivación

La construcción de proyectos de ingeniería civil requiere una comprensión profunda de las desviaciones estándar en los rendimientos de las actividades. Esta comprensión se dificulta porque la desviación estándar no es intuitiva. Es más intuitivo el concepto de variabilidad, que aunque no corresponde a un concepto estadístico propiamente tal, se puede entender como la diferencia entre un rendimiento determinado y un rendimiento medio, dividido por el rendimiento medio. (Si el rendimiento determinado es igual al rendimiento medio, la variabilidad es nula).

Ferrada (2019) define la variabilidad de modo análogo para la duración de actividades y con dicha definición, demuestra que las variabilidades calculadas a partir de los datos reales de algunas actividades de la ingeniería civil son similares a las que Rodríguez (2016) levantó a partir del juicio de expertos.

En la presente memoria se sigue un recorrido equivalente al de Ferrada (2019) para calcular las variabilidades de los rendimientos de actividades, desarrollando un ejemplo particular con datos de la ejecución del sostenimiento de túneles interestación del Proyecto de la Línea 6 del Metro de Santiago.

La apuesta es que las variabilidades de los rendimientos de actividades deben ser similares a las variabilidades de la duración de actividades si es que las actividades en cuestión son similares. Dado que Ferrada (2019) también trabaja con datos de túneles interestación del Proyecto de Línea 6 del Metro de Santiago, es posible entonces comprobar lo expuesto. Cabe destacar que la base de datos utilizada en la presente memoria es una base de datos mayor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo general del trabajo de título es analizar las desviaciones en los rendimientos de actividades en proyectos de ingeniería civil utilizando el concepto de variabilidad.

1.2.2 Objetivos Específicos

El trabajo de título cuenta con los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la distribución de los rendimientos de las actividades y determinar a qué tipo de distribución se asemejan. Además, calcular la magnitud de las desviaciones observadas.
- Aplicar metodología presentada por Roberto Ferrada para estimar rendimientos de actividades en proyectos futuros cuando se disponen datos de proyectos pasados.
- Analizar si las variabilidades de los rendimientos de actividades son similares a las variabilidades de la duración de actividades para un mismo tipo de actividad.

1.3 Alcances

Los alcances de este trabajo de título se centran en el análisis de las desviaciones en los rendimientos de las actividades. La investigación se enfoca en examinar estas desviaciones de manera individual con el propósito de aplicar este conocimiento en estimaciones futuras. Para lograr este análisis, es esencial contar con una muestra de datos estadísticamente significativa proveniente de proyectos previos.

1.4 Metodología

1.4.1 Estado del Arte

Se llevará a cabo la recopilación de datos provenientes de la ejecución del sostenimiento de túneles interestación del Proyecto de la Línea 6 del Metro de Santiago.

Posteriormente, se realizará una minuciosa revisión de esta información, identificando con precisión los datos relevantes y organizándolos de manera sistemática. Mantener un riguroso orden en este proceso resulta esencial para garantizar la efectividad y coherencia en el análisis de los datos recopilados.

Además, se estudiará la metodología propuesta por Roberto Ferrada (2019) para el análisis estadístico de la estimación de duración y de rendimiento de actividades.

1.4.2 Análisis de datos

Se utiliza herramientas de análisis estadístico para estimar relaciones entre las variables, analizar la distribución de los rendimientos de las actividades y determinar el tipo de distribución que se asemeja mejor a los datos.

1.4.3 Aplicación metodología estadística

Utilizando la analogía con la evaluación estadística del hormigón propuesta por Ferrada (2019), se aplica una metodología para estimar el rendimiento de las actividades utilizando la media y la desviación estándar cuando se posee una muestra estadísticamente suficiente. Se asume que los rendimientos se comportan de acuerdo con una distribución de probabilidad normal, enfatizando la importancia de seleccionar un nivel de confianza adecuado para realizar las estimaciones.

1.4.4 Estudio Paramétrico

Se presenta el proyecto de ingeniería civil correspondiente a la ejecución del sostenimiento de túneles interestación de Metro, donde se definen actividades reiterativas y se recopila información sobre los rendimientos. Luego, se aplica la metodología estadística propuesta y se obtienen las desviaciones correspondientes.

En los casos donde se posean muestras de datos de tamaño $N < 30$, se debe demostrar que han sido extraídas de una población que se distribuye normalmente. Por lo anterior, cuando se tengan muestras pequeñas se realiza una prueba de Kolmorov-Smirnov. Por otro lado, en los casos donde se posean muestras de datos de tamaño $N > 30$ se realizan histogramas con los datos de los rendimientos.

1.4.5 Análisis de Resultados

Se analiza la metodología empleada a través de los histogramas creados y se observa la factibilidad de utilizar la distribución normal en el comportamiento de los rendimientos de distintas actividades.

1.5 Resultados Esperados

En base al estudio realizado, los resultados esperados son los siguientes:

- Utilizar los datos recopilados para determinar las desviaciones en los rendimientos de las actividades.
- Establecer patrones sobre las desviaciones esperadas, considerando un nivel de confianza específico.
- Verificar que las variabilidades de los rendimientos de actividades son similares a las variabilidades de la duración de actividades para un mismo tipo de actividad.

2 Marco conceptual

2.1 Dirección de proyectos

2.1.1 Definición

El Project Management Institute (PMI), a través de la guía Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide), describe la dirección de proyectos como la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo. Esto se logra mediante la correcta aplicación e integración de los procesos implicados, que se categorizan en cinco grupos principales: iniciación, planificación, ejecución, control y cierre.

Dirigir un proyecto por lo general conlleva principalmente la tarea de identificar los requisitos, abordar las diversas necesidades, inquietudes y expectativas de los interesados a medida que se planifica y ejecuta el proyecto. Además, implica encontrar un equilibrio entre las restricciones contrapuestas que pueden surgir, como el alcance, la calidad, el presupuesto y el cronograma, ya que están relacionados entre sí de tal manera que cualquier modificación en uno de ellos probablemente afectará al menos a otro aspecto.

En este contexto, los profesionales desempeñan un papel crucial al ser responsables de encontrar este equilibrio. Lograr esto implica identificar con precisión la cantidad de recursos necesarios y el tiempo requerido para llevar a cabo las actividades del proyecto. Esta información no solo facilita una gestión más eficaz, sino que también contribuye a mejorar el rendimiento de las actividades al alinearlas más estrechamente con la realidad, lo que en última instancia conduce a lograr el éxito en la finalización del proyecto.

2.1.2 Procesos de la dirección de proyectos

Según el PMI, para que un proyecto tenga éxito se deben seleccionar los procesos adecuados requeridos para alcanzar los objetivos del mismo. Un proceso se define como un conjunto de acciones y actividades interrelacionadas realizadas para obtener un producto, resultado o servicio predefinido. Cada proceso se caracteriza por sus insumos, las herramientas y técnicas utilizadas, así como los resultados que produce como salida.

Los procesos de la dirección de proyectos se agrupan en cinco grupos (PMI, 2013):

- **Proceso de iniciación**

Comprende los procesos realizados para definir un nuevo proyecto o una nueva fase de un proyecto ya existente, mediante la obtención de la autorización.

- **Proceso de planificación**

Son requeridos para establecer el alcance del proyecto, refinar los objetivos y definir el curso de acción necesario para alcanzar los objetivos planteados.

- **Proceso de ejecución**

Consiste en los procesos realizados para completar el trabajo definido en el plan para la dirección del proyecto a fin de cumplir con las especificaciones del mismo.

- **Proceso de seguimiento y control**

Involucra los procesos requeridos para monitorear, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes.

- **Proceso de Cierre**

Aquellos procesos realizados para finalizar todas las actividades a través de todos los grupos de procesos, a fin de cerrar formalmente el proyecto o una fase del mismo.

Los grupos de procesos están relacionados entre sí a través de los resultados que producen, donde los resultados de unos corresponden la entrada de otros.

En el contexto de este trabajo, el proceso de planificación juega un papel fundamental. Durante esta fase, el análisis detallado de desviaciones en rendimientos de actividades pasadas puede proporcionar información valiosa para mejorar las estimaciones futuras y optimizar la asignación de recursos y plazos en la planificación del proyecto.

Al identificar patrones de desviaciones previas, se pueden tomar decisiones más fundamentadas para garantizar la viabilidad y el éxito del proyecto en las etapas posteriores.

2.2 Rendimientos

Estimar los recursos y el tiempo que se requerirá para completar cada una de las actividades de un proyecto, y en particular, en uno de ingeniería civil adquiere cada vez mayor importancia, tanto para establecer una planificación inicial sólida como para estimar la ruta crítica del proyecto. Por esta razón, el concepto de rendimiento cobra una relevancia cada vez mayor.

2.2.1 Definición

El rendimiento corresponde a la cantidad de trabajo completado en relación con el tiempo y los recursos empleados. Se encuentra relacionado directamente con el avance o porcentaje de ejecución de un proyecto, el rendimiento se puede cuantificar por mediciones realizadas en las obras y está sujeto a las condiciones de cada uno de los empleados (Consuegra, 2006).

Es esencial diferenciar los conceptos de rendimiento y productividad, siendo este último definido por la EANPC (en inglés, European Association of National Productivity Centres) como que tan eficiente y eficaz los productos y servicios son producidos. En ambos casos, el objetivo es siempre optimizar y reducir sus valores para lograr una mayor producción con un uso más eficiente de los recursos, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y una optimización de insumos.

2.2.2 Factores de afectación en los rendimientos

En el artículo escrito por Botero se hace énfasis en que cada proyecto de construcción es diferente y se realiza en diversas condiciones, derivándose en diferentes factores que influyen positiva o negativamente en los rendimientos:

- **Economía general**

Este factor se refiere al estado económico de la nación o el área específica en donde se desarrolla el proyecto. Influye directamente en:

- Tendencia de los negocios en general.
- El volumen de trabajo o construcción global en la región de influencia del proyecto.
- Las posibilidades de empleo.

Cuando la economía general es sólida, la productividad tiende a disminuir, debido a que, en tiempos de prosperidad económica, la búsqueda de mano

de obra y supervisores competentes se vuelve más complicada, a menudo requiriendo la incorporación de personal menos experimentado. Por otro lado, en situaciones económicas normales, la productividad tiende a mejorar, ya que, en condiciones normales, se dispone de personal calificado para realizar labores de supervisión y ejecución de las actividades.

- **Aspectos laborales**

La presencia de personal altamente capacitado en la ubicación de ejecución de las tareas, así como la eventualidad de tener que movilizar empleados desde otros lugares con condiciones salariales a veces divergentes de las de la región, constituyen factores de gran relevancia a considerar. Los aspectos por considerar:

- El tipo de contrato.
- Contar con obreros que estén sindicalizados.
- Incentivos por labor cumplida. Una clara y sana política de incentivos aumenta el rendimiento.
- Salarios o pagos en función de la cantidad de trabajo que realiza en lugar de recibir un salario fijo por tiempo trabajado.
- Ambiente de trabajo.
- Seguridad social.
- Seguridad industrial.

Estos aspectos laborales son fundamentales para garantizar un entorno laboral óptimo y mejorar el rendimiento de los trabajadores en el proyecto.

- **Clima**

Es importante tener en cuenta los antecedentes climáticos en el área de construcción del proyecto para anticipar las condiciones durante la ejecución de la obra. Por ejemplo, la presencia de lluvias o un exceso de calor puede reducir la productividad, por lo que podría ser beneficioso crear un entorno protegido, como una estructura techada.

- **Actividad**

Los rendimientos pueden verse afectados por factores como las particularidades de la actividad, las interacciones con otras, el plazo de ejecución, los recursos disponibles y el contexto general de la obra. Se deben considerar los siguientes factores:

- Grado de dificultad de la actividad y riesgo de exposición.
- Interferencias e interrupciones en la realización de las actividades.
- Orden, espacio de trabajo y aseo del lugar.
- Actividades predecesoras.
- Actividades repetitivas.

- **Equipamiento**

La disponibilidad y estado del equipo influyen en el rendimiento laboral. Esto incluye la calidad y adecuación de las herramientas, el estado y disponibilidad del equipo, el mantenimiento oportuno, la entrega puntual de equipos y herramientas adecuados. Por otro lado, aquí también se debe considerar la provisión de elementos de protección personal para garantizar la seguridad.

- **Supervisión**

La calidad y experiencia de los supervisores en la obra tienen un impacto significativo en la productividad. Los factores clave a considerar incluyen:

- Establecimiento de criterios de aceptación para actividades.
- Capacitación y claras instrucciones al personal.
- Un seguimiento adecuado en todas las etapas del proceso.
- Competencia y experiencia del supervisor en relación con los trabajadores.
- Implementación de sistemas de gestión de calidad en la empresa y su aplicación en los proyectos, lo cual promueve un entorno favorable para mejorar la productividad.

- **Trabajador**

Los aspectos personales del operario deben considerarse, ya que afectan su desempeño. Los factores que se incluyen en esta categoría son:

- La situación personal, el ritmo de trabajo y las habilidades de los trabajadores impactan en su desempeño laboral. Teniendo estrecha relación con los rendimientos.
- El nivel de capacitación alcanzado, el desempeño y la actitud hacia el trabajo, pueden favorecer o perjudicar la eficiencia de su labor.

2.2.3 Métodos de estimación

Para una comprensión más completa de cómo se estiman estos valores Consuegra(2006) señala que para la elaboración de estudios de rendimientos debe tener en cuenta lo siguiente:

- Las actividades cuyo rendimiento se pretende establecer deben estar suficientemente definidas en su alcance y sus circunstancias para que los datos obtenidos puedan considerarse como representativos.
- A pesar de lo anterior, es necesario tener en cuenta que no existen rendimientos de validez universal, pues el desempeño de las personas en su trabajo está condicionado por diferentes aspectos, como, por ejemplo, las circunstancias que se estén viviendo en lo empresa, la ciudad o el país y las peculiaridades de cada obra, todo lo cual puede originar rendimientos diferentes para actividades aparentemente iguales.
- De igual manera, se puede afirmar que los rendimientos no son inmutables

A continuación, se presentan métodos tradicionales para la determinación de los rendimientos:

- **Promedio de resultado**

El sistema de promedios se basa en la recolección diaria de información en diferentes circunstancias, para diferentes obras en diferentes épocas, que luego se tabula en formatos mensuales para obtener promedios representativos.

Por medio de esta metodología, se deducen rendimientos promedio expresados en términos de cantidad de obra por unidad de tiempo o de tiempo necesario por unidad de obra. Pero estos pueden sufrir variaciones para acomodarse a distintas circunstancias propias de cada constructor y de cada obra

- **Estudio de tiempo y movimiento**

Este es típico de la industria manufacturera, que tiene puestos fijos de trabajo, operaciones estandarizadas, líneas de montaje, empleados estables y especializados y muy buena proporción de supervisores, todo lo cual permite determinar los rendimientos con exactitud cronométrica. No se acomoda mucho al área de la construcción.

Ha sido tradicional la utilización de bases de datos comerciales sobre rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción, como soporte en el análisis del costo y tiempo del proyecto a ejecutar. Los estimativos allí presentados se alejan muchas veces de la realidad, generando en el sector gran desconfianza, debido a su alta dispersión. (Botero F. , 2002).

Lo descrito por Botero explica de mejor forma el fundamento de este trabajo. Poder estimar desviaciones en los valores de rendimientos y consumos de mano de obra en proyectos de ingeniería civil permite tener un mayor acercamiento a la realidad de la ejecución de obras. Esto resulta crucial, ya que posibilita que las futuras planificaciones sean más precisas y se ajusten de manera más adecuada a las condiciones y requisitos específicos de cada proyecto en cuestión.

2.3 Evaluación Estadística

En el ámbito de la investigación científica, es común emplear herramientas de análisis estadístico para evaluar conjuntos de datos interrelacionados. Estos datos suelen representar resultados de investigaciones relacionadas entre sí y permiten clasificar ciertas características de una muestra seleccionada al azar. Las conclusiones obtenidas a menudo se aplican a la población en su conjunto. Para llevar a cabo un análisis estadístico preciso, se establecen y utiliza lo expresa a continuación.

2.4 Población

Población es el conjunto completo de todos los individuos, las cosas o los eventos sobre los que se quiere investigar con respecto a una particularidad dada. A la población le correspondería la colección completa de datos –casi siempre imposible de elaborar por su tamaño u otras condiciones– sobre los cuales se harán inferencias (Triola, 2018).

2.4.1 Muestra

Cuando se recolectan datos sobre las características de una población, suele ser poco práctico observar el grupo en su totalidad, en especial si se trata de un grupo grande. En estos casos, se examina sólo una pequeña parte del grupo, es decir, subconjunto de miembros seleccionados de una población al que se le llama muestra.

Debido a que las poblaciones suelen ser muy grandes, un objetivo común del uso de la estadística es obtener datos de una muestra y luego utilizarlos para sacar una conclusión acerca de la población (Triola, 2018).

2.4.2 Medidas de Tendencia Central

Es un valor típico o representativo de un conjunto de datos. Como estos valores típicos tienden a encontrarse en el centro de los conjuntos de datos, ordenados de acuerdo con su magnitud, a los promedios se les conoce también como medidas de tendencia central. (Spiegel & Stephens, 2009). La más utilizada corresponde a la media aritmética, más conocida como promedio.

- **Media Aritmética**

Corresponde al promedio y se expresa como \bar{x} cuando los datos corresponden a una muestra de una población; si los datos son la población entera, la media se expresa mediante μ . La media de una muestra de tamaño N se define como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^N x_j}{N} \quad (2.1)$$

Una desventaja de la media es que un solo valor extremo (atípico) puede cambiar el valor de la media en forma sustancial y deja de ser tan representativo. Para evitar esto se suele utilizar la metodología Z-score para descartar valores atípicos (Anexo C: Método Z-scores).

2.4.3 Medidas de variación

- **Desviación Estándar**

Corresponde a la variación esperada con respecto a la media de la muestra. La desviación estándar de una muestra se denota por s, mientras que la desviación estándar de una población por σ . La desviación estándar se define como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}{N}} \quad (2.2)$$

- **Varianza**

La varianza de un conjunto de valores es una medida de variación igual al cuadrado de la desviación estándar.

- Varianza muestral s^2 : cuadrado de la desviación estándar s .
- Varianza poblacional σ^2 : cuadrado de la desviación estándar poblacional σ .

Las unidades de la varianza son los cuadrados de las unidades de los valores de datos. También se clasifica como no resistente, es decir, puede aumentar dramáticamente con la inclusión de valores atípicos.

La varianza es un estadístico utilizado en algunos métodos estadísticos, pero para nuestros propósitos actuales, la varianza tiene la seria desventaja de usar unidades que son diferentes de las unidades del conjunto original de datos. Esto dificulta entender la varianza en cuanto a su relación con el conjunto de datos original. Debido a esta propiedad, es mejor centrarse primero en la desviación estándar al intentar desarrollar una comprensión de la variación (Triola, 2018).

- **Coefficiente de Variación**

Se denota por V y en general se expresa como porcentaje. El coeficiente de variación es independiente de las unidades que se empleen, por lo que resulta útil cuando se trata de comparar distribuciones en las que las unidades son diferentes. Viene dado por:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad (2.3)$$

2.5 Distribuciones de Probabilidad

Las distribuciones de probabilidad de un conjunto de dato permiten entender la naturaleza o forma de la dispersión de los datos sobre el rango de valores, como, por ejemplo, en forma de campana (Triola, 2018).

A continuación, se presentan las distribuciones que serán utilizadas como herramientas para obtener estimaciones de los rendimientos de las actividades durante la ejecución de este trabajo de título. Estas desempeñarán un papel esencial en la modelización de los posibles escenarios y nos permitirán evaluar de manera más completa las diferentes variables que influyen en los rendimientos.

2.5.1 Distribución Normal

La distribución normal es una herramienta estadística con muchas aplicaciones importantes del mundo real (Triola, 2018). Spiegel y Stephens (2009), la definen mediante la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)(X-\mu)^2/\sigma^2} \quad (2.4)$$

Donde μ corresponde a la media y σ corresponde a la desviación estándar.

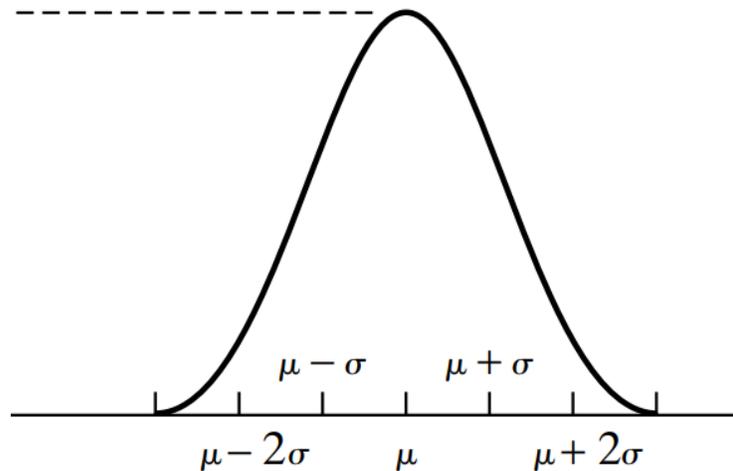


Figura 2-1: Curva de distribución normal

Fuente: A first course in probability

La distribución normal se expresa como una gráfica simétrica y con forma de campana, como se muestra en la Figura 2-1. El total del área, que está limitada por la curva expresada en la ecuación anterior y por el eje X es 1; por lo tanto, el área bajo la curva comprendida entre $X = a$ y $X = b$, donde $a < b$ representa la probabilidad de que X se encuentre entre a y b. Esta probabilidad se denota por $\Pr(a < X < b)$ (Spiegel y Stephens, 2009).

2.5.2 Distribución Normal Estándar

Poder resolver la ecuación 2.4 se requiere resolver integrales de funciones de densidad, por lo que resulta más complicado encontrar áreas. Por lo anterior se puede estandarizar la curva, obteniendo una distribución normal con los parámetros $\mu=0$ y $\sigma=1$, esto realizando el cambio de variable:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2.5)$$

Se tiene entonces, la llamada forma estándar:

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)z^2} \quad (2.6)$$

La conversión anterior se puede observar gráficamente en la Figura 2-2:

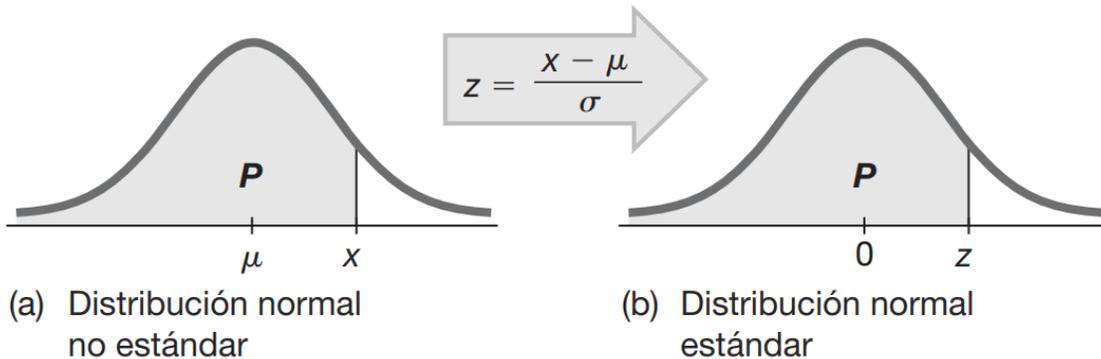


Figura 2-2: Conversión de distribución

Fuente: Triola, 2018

Siempre que X toma un valor x , el valor correspondiente de Z está dado por $z = (X - \mu)/\sigma$. Por tanto, si X cae en entre los valores $x = x_1$ y $x = x_2$, la variable aleatoria Z caerá entre los valores correspondientes $z_1 = (x_1 - \mu)/\sigma$ y $z_2 = (x_2 - \mu)/\sigma$.

Para estimar los valores de la probabilidad de que $Z > z$, se usa la tabla de la distribución normal estándar, que corresponde a la *Tabla A-0-1*, presente en el Anexo Anexo A: Tablas de Distribuciones de este trabajo. Con el fin de mostrar cómo se utiliza, se buscará la probabilidad de que Z sea mayor a 0,97. Primero, se localiza un valor de z igual a 0,9 en la columna izquierda, después se mueve a lo largo del renglón a la columna bajo 0,07, donde se lee 0,1660. Por tanto, $P(Z > 0,97) = 0,1660$. Para encontrar el caso opuesto, es decir, la probabilidad de que Z sea menor a 0,97, basta con tomar el resultado anterior y restárselo a 1, dando como resultado $P(Z > 0,97) = 0,8340$.

Otra cosa por mencionar es que las áreas comprendidas entre $z = -1$ y $z = +1$, $z = -2$ y $z = +2$, y $z = -3$ y $z = +3$ son iguales, respectivamente, a 68.27 %, 95.45 % y 99.73 % del área total, que es 1.

2.5.3 Distribución t de Student

La distribución t de Student se utiliza principalmente en pruebas de hipótesis y en la construcción de intervalos de confianza cuando los tamaños de muestra son pequeños o cuando la desviación estándar de la población es desconocida.

De la misma manera que en las secciones anteriores, Spiegel y Stephens (2009), presentan el siguiente estadístico:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{N}} \quad (2.7)$$

Si se consideran muestras de tamaño N extraídas de una población normal (o aproximadamente normal) cuya media es μ y si para cada muestra se calcula t, usando la media muestral \bar{x} y la desviación estándar muestral s, se obtiene la distribución muestral de t. En la Figura 2-3 se presenta la forma de la distribución.

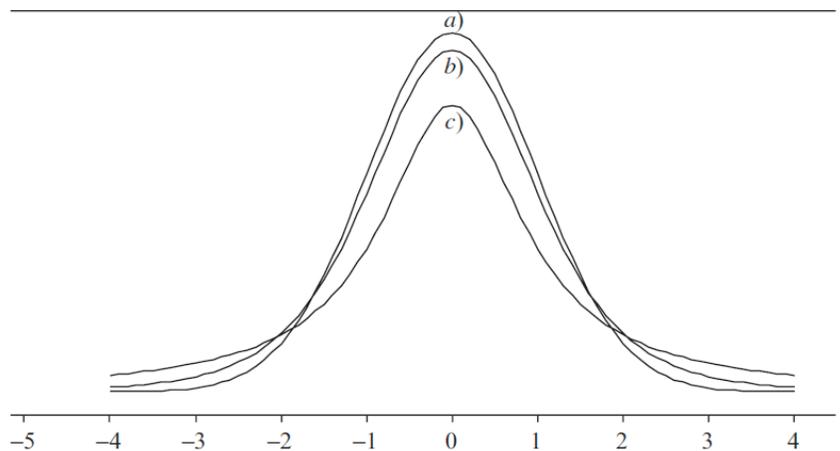


Figura 2-3: a) Curva normal estándar, b) t de Student para $v=5$, c) t de Student para $v=1$

Fuente: A first course in probability

Donde la constante $v = (N-1)$ se le conoce como el número de grados de libertad (v es la letra griega un). Si los valores de N son grandes ($N > 30$), la distribución t de student se aproxima a una distribución normal estándar.

2.5.4 Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS)

La prueba KS es utilizada para determinar si una muestra proviene de una distribución específica. En este contexto, sirve para determinar si las muestras siguen una distribución normal.

Para llevar a cabo esta prueba se utilizará el programa IBM SPSS Statistics, el procedimiento se explica en el Anexo E: Prueba de Kolmorov-Smirnov del presente trabajo.

2.6 Método propuesto por Roberto Ferrada

En la memoria para optar al título de ingeniero civil realizada por Roberto Ferrada (2019), se propone un enfoque para entender la duración de una actividad cuando se tiene una muestra con media y desviación estándar conocida. Este enfoque también se puede extrapolar de manera análoga para estimar rendimientos.

2.6.1 Introducción analógica

Se presenta el caso de la evaluación estadística del hormigón, descrita por el INN (Instituto Nacional de Normalización) en la norma NCh1998.Of89. Específicamente se analiza el método de evaluación el lote por el total de muestras. Como es sabido, el comportamiento de las muestras de hormigón sigue una distribución normal, tal como se muestra en la Figura 2-4.

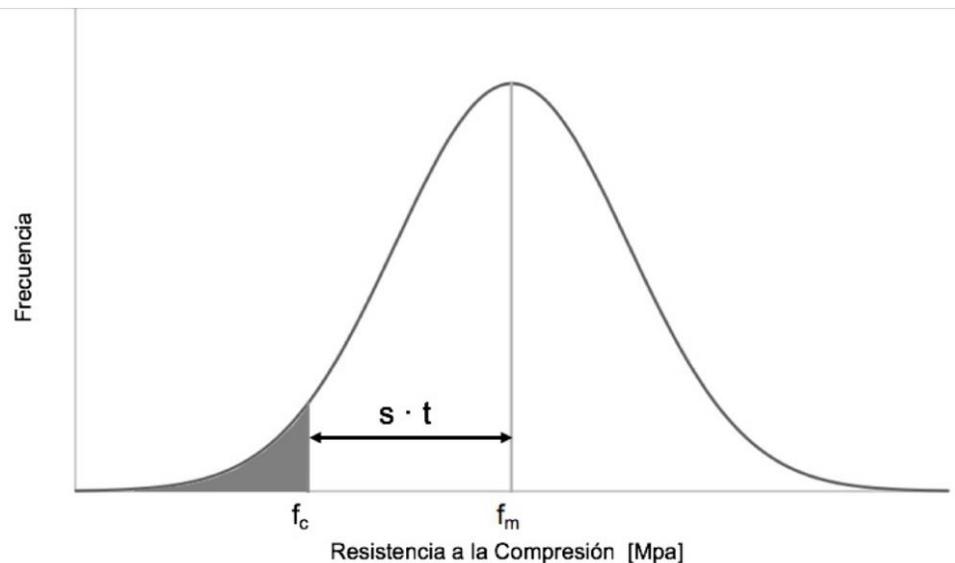


Figura 2-4: Distribución normal resistencia a la compresión del hormigón

Fuente: Roberto Ferrada

Donde:

- f_m : resistencia media muestral del lote, en [MPa];
- s : desviación estándar de la muestra, en [MPa];
- f_c : resistencia especificada a la rotura por compresión [MPa];
- t : coeficiente estadístico según nivel de confianza y grados de libertad;

Al momento de preparar el hormigón, es crucial dosificar adecuadamente para garantizar que la resistencia media mínima a la compresión cumpla con la siguiente expresión:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 indica que para alcanzar un valor específico f_c , y asumiendo s fijo, mientras mayor sea el valor de t , más exigente se debe ser con la disposición del cemento, puesto que f_m tiene la obligación de ser mayor. En otras palabras, a medida que se aumenta el nivel de confianza, se requiere una resistencia media del lote más alta para asegurar que se cumplan los estándares de calidad requeridos.

El valor del coeficiente estadístico t se obtiene a partir de la Tabla B-0-3: **Valores factor estadístico t** presentada por la norma NCh1988.Of89, la cual se adjunta en el Anexo B: Factor estadístico. Siendo los más utilizados para muestras de más de 30 datos los presentes en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Valor coeficiente estadístico t según nivel de confianza para número de muestras ≥ 30

Nivel de confianza	Factor estadístico t
95%	1,645
90%	1,282
80%	0,842

Fuente: NCh1998Of89

Para ilustrar este enfoque, si se desea lograr un hormigón con resistencia específica a la compresión f_c igual a 30 [MPa] con un nivel de confianza de un 90 %, es decir, una fracción defectuosa del 10%, asumiendo que las plantas de hormigón tienen típicamente una desviación s de 4 [MPa] y considerando un número de muestras mayor a 30, por lo que $t = 1,28$, se tiene reemplazando en la ecuación 2.8, que:

$$f_m \geq 30 \text{ [MPa]} + 4 \text{ [MPa]} \cdot 1,28 = 35 \text{ [MPa]} \quad (2.9)$$

En conclusión, para asegurar con un nivel de confianza del 90 % que un hormigón tenga una resistencia a la compresión de 30 [MPa], es necesario calcular una dosificación tal que la resistencia media a la compresión sea igual o superior a 35 [MPa].

Tomando en cuenta este escenario, el objetivo es aplicar esta misma lógica a la estimación de los rendimientos de las actividades. La población de interés en este estudio corresponde a los rendimientos de cualquier actividad, y el propósito es determinar cómo estimar dichos rendimientos para un proyecto futuro utilizando más que simplemente el promedio y las desviaciones.

2.6.2 Análisis Estadístico de la Estimación de Rendimientos de Actividades

Ferrada (2019) estipuló que, de modo análogo al caso del hormigón, donde la pregunta es con cuánto cemento se debe dosificar, aquí la pregunta es con cuántos recursos se debe contar para asegurar que se logre un rendimiento r con un nivel de confianza determinado.

Se asume que el rendimiento de la actividad se ajusta a una distribución normal con media muestral y desviación estándar muestral conocidas, por tanto, es posible obtener la probabilidad de que cierto valor aleatorio r se encuentre sobre un rendimiento determinado.

En la Figura 2-5, se presentan las características de la curva de distribución que incorpora esta situación.

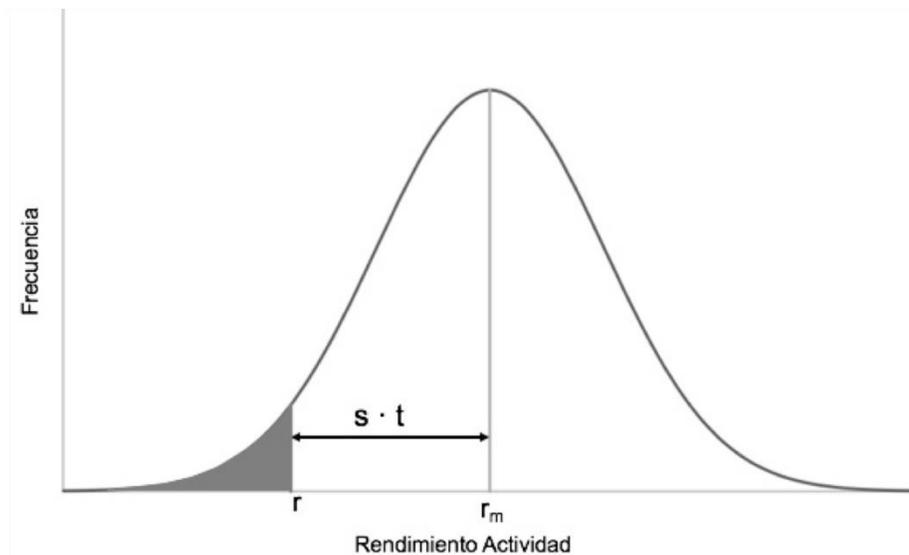


Figura 2-5: Curva de distribución normal del rendimiento de una actividad

Fuente: Roberto Ferrada

Donde:

- r_m : rendimiento medio muestral, en [MPa];
- s : desviación estándar de la muestra, en [MPa];
- r : rendimiento esperado de la actividad [MPa];
- t : coeficiente estadístico según nivel de confianza y grados de libertad;

Por la naturaleza del problema, para asegurar un determinado rendimiento esperado r , se debe contar con recursos que aseguren un rendimiento r_m superior a r .

La expresión que relaciona ambos rendimientos queda dada por:

$$r_m \geq r + s \cdot t \quad (2.10)$$

La ecuación 2.10 indica que para lograr un determinado rendimiento esperado r , y asumiendo s fijo, mientras mayor es el nivel de confianza que se quiere imponer para r , lo que significa mayor t , más exigente se debe ser con la disposición de recursos, puesto que r_m tiene la obligación de ser mayor.

Otra forma de abordar el problema es plantearse el nivel de confianza que se obtiene para el rendimiento de una determinada actividad cuando se tienen datos de proyectos anteriores.

Despejando la ecuación 2.10, se tiene que:

$$r \leq r_m - s \cdot t \quad (2.11)$$

De modo análogo al caso de la evaluación del hormigón, se puede razonar que, dado un r_m y un s , si el nivel de confianza aumenta, la expectativa sobre r será inferior (se asumirá que se tiene una menor eficiencia).

En la contrapartida, dado un r_m y un s , si el nivel de confianza decrece, la expectativa sobre r será mayor (se asumirá que se tiene una mayor eficiencia).

También se puede concluir que, dado un r_m y un s , r tiende a r_m en la medida que se considere un nivel de confianza muy bajo o bien, en la medida que s tienda a 0.

2.7 Desviaciones de los rendimientos de actividades analizando datos reales

Para el desarrollo analítico del presente trabajo, se cuenta con actividades que forman parte de la ejecución de sostenimientos de una parcialidad de los túneles interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago

El proyecto consta de avances de 1 [m] y avances de 1,5 [m], tanto en gravas como en finos.

En las figuras siguientes se presentan las secciones de túnel interestación de la Línea 6 del Metro de Santiago, las que fueron excavadas de modo convencional siguiendo el New Austrian Tunneling Method (NATM) entre los años 2013 y 2015. En la Figura 2-6 se presenta la sección herradura, que típicamente se utiliza a través de gravas, mientras que en la Figura 2-7, la sección con contrabóveda, que típicamente se utiliza a través suelos finos.

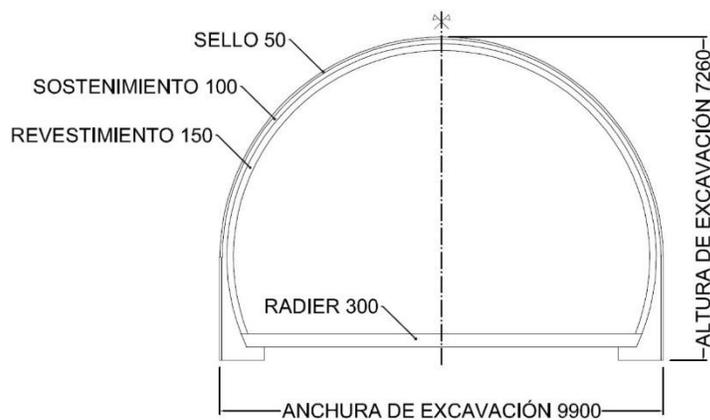


Figura 2-6: Sección Túnel Interestación tipo Herradura (medidas en mm)

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

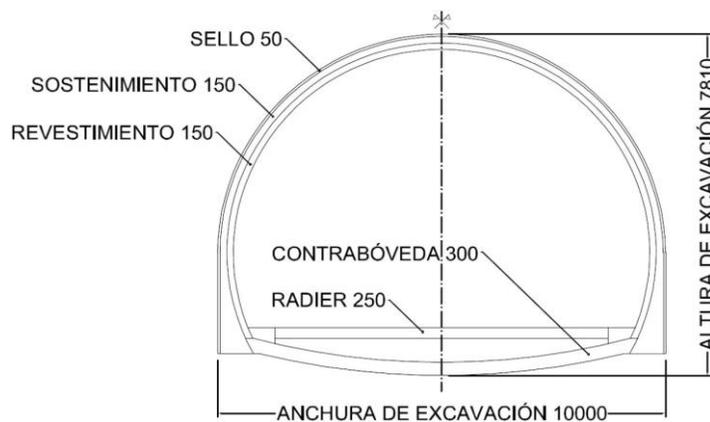


Figura 2-7: Sección Túnel Interestación tipo con Contrabóveda (medidas en mm)

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

La construcción del sostenimiento del túnel constó de las siguientes actividades:

- **Excavación**

Consiste en la excavación longitudinal del túnel mediante excavadora. Esta excavación genera el espacio para los elementos del sostenimiento.

- **Perfilado para Marco**

Consiste en el ajuste de la forma de la excavación para que la instalación del marco no tenga dificultades.

- **Sello**

Aplicación de una capa de hormigón proyectado para mantener la integridad de la excavación.

- **Mallado entre Marcos**

Consiste en la instalación de una malla de acero electrosoldado entre el sello y el marco reticulado. La malla se coloca en cada avance, de marco en marco.

- **Instalación de Marco**

Corresponde al montaje del marco reticulado.

- **Hormigón Proyectado**

Aplicación de una capa de hormigón proyectado sobre el sello, las mallas y el marco. En el sector de obra de estudio, el hormigón proyectado se aplicó por vía húmeda, con medios mecánicos.

El estudio considera 37 avances de excavación de 1 [m] y 24 de 1,5 [m] en gravas, por otro lado, para los finos se consideran 20 avances de 1 [m] y 66 de 1,5 [m], tales datos se muestran en las tablas presentes en el Anexo D: Datos Ejecución Sostenimiento Túnel de Metro. Las demás actividades, que se ejecutan junto a la actividad de excavación en cada avance, poseen la misma cantidad de datos registrados.

3 Estudio Estadístico

Ferrada (2019) define la variabilidad de la duración de las actividades como:

$$\text{Variabilidad [\%]} = \frac{d - d_m}{d_m} \cdot 100 \quad (3.1)$$

De manera análoga, la variabilidad del rendimiento de las actividades se puede definir como:

$$\text{Variabilidad' [\%]} = \frac{r - r_m}{r_m} \cdot 100 \quad (3.2)$$

El rendimiento esperado r se calcula en la igualdad de la ecuación 2.11. De este modo, la variabilidad del rendimiento de las actividades es equivalente a:

$$\text{Variabilidad' [\%]} = \frac{s \cdot t}{r_m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

La ecuación 3.3 será evaluada a partir de los datos presentados en la sección anterior.

Antes se utiliza el método Z-score para identificar y descartar los valores que puedan considerarse atípicos y no representativos. La exclusión de estos valores anómalos es crucial para garantizar la integridad y precisión del análisis posterior, ya que su inclusión podría distorsionar los resultados. El procedimiento detallado se expone en el Anexo C: Método Z-scores del presente trabajo.

Es fundamental considerar la distribución de los datos. Se asume que los rendimientos se comportan como una distribución t de Student. Si las muestras tienen un tamaño mayor a 30, se puede considerar que esta distribución se asemeja bastante a una distribución normal estándar, permitiendo calcular el promedio y las desviaciones de manera directa. Sin embargo, cuando los datos son menores a 30, no se puede asumir que la distribución se comporte como una estándar. Por lo tanto, se realiza la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, cuyo procedimiento se expone en el Anexo E: Prueba de Kolmorov-Smirnov del presente trabajo.

Posteriormente, se emplea la aplicación de la metodología propuesta por Roberto Ferrada (2019) para estimar el rendimiento de actividades, esto usando los resultados obtenidos anteriormente. Al considerar la media y la desviación estándar de las muestras de actividades pasadas, se puede calcular un rendimiento esperado con un nivel de confianza determinado.

Ferrada estudia las desviaciones de la duración de actividades, con datos de proyectos construidos de igual características como es el caso de la construcción de túneles de Metro. En su estudio, presenta la variabilidad de estas estimaciones. A pesar de que los rendimientos se comportan de manera inversa, una teoría planteada sugiere que la magnitud de la variabilidad es comparable.

4 Cálculo de desviaciones de actividades

En el presente capítulo se analizan las desviaciones de los datos recopilados para dos tipos: aquellas relacionadas con gravas y las que conciernen a finos. Se dispone de una muestra de datos para cada una de las actividades consideradas en este estudio.

El estudio de las desviaciones del rendimiento de estas actividades permite una planificación y programación más precisa, lo que ayuda a minimizar los retrasos y optimizar los recursos disponibles. Los cronogramas de proyecto pueden desarrollarse con mayor confianza al basarse en datos de rendimiento consistentes y predecibles. Una baja desviación en los datos indica que los resultados son consistentes y predecibles, lo que puede ser una señal positiva en términos de gestión de proyectos.

Con el objetivo de garantizar la integridad y fiabilidad de los datos, se aplicó la metodología Z-Score para identificar y descartar valores atípicos. Este método implica calcular la puntuación Z de cada punto de datos, que representa el número de desviaciones estándar por encima o por debajo de la media. Aquellos puntos de datos cuya puntuación excedía un umbral de ± 2 desviaciones estándar se consideraron atípicos y fueron excluidos del análisis. Este procedimiento se llevó a cabo para asegurar que los resultados estuvieran libres de influencias anómalas que pudieran distorsionar la interpretación de los datos.

4.1 Gravav

A continuación, en las Tabla 4-1 y Tabla 4-2 se presentan los resúmenes de la cantidad de datos para cada actividad relacionadas con gravas, correspondientes a los avances de 1 [m] y 1,5 [m], tras aplicar el criterio de exclusión de valores atípicos mediante la metodología Z-Score.

Tabla 4-1: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1 [m] para gravas

Avance	Cantidad de Datos Medidos
Excavación	33
Perfilado Marco	37
Sello	37
Mallado entre Marcos	37
Instalación de Marco	36
Hormigón Projectado	36

Fuente: Anexo D (Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago)

Tabla 4-2: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1,5 [m] para gravas

Avance	Cantidad de Datos Medidos
Excavación	24
Perfilado Marco	24
Sello	23
Mallado entre Marcos	22
Instalación de Marco	22
Hormigón Proyectado	23

Fuente: Anexo D (Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago)

Estos datos proporcionan una base sólida para llevar a cabo un análisis detallado de las desviaciones en cada actividad relacionada con gravas, lo que permitirá una comprensión más precisa de los resultados y una evaluación más rigurosa de los procesos involucrados en este tipo de actividades.

Para el caso del avance de 1 [m], donde los tamaños de las muestras son $N > 30$, se puede asumir que los datos se comportan según una distribución t de Student, la cual se aproxima a una distribución normal estándar. Se realizaron histogramas para cada una de las actividades utilizando el software IBM SPSS Statistics, los cuales se pueden observar en el Anexo E: Prueba de Kolmorov-Smirnov del presente trabajo.

Se procede al cálculo del valor del rendimiento promedio y la desviación estándar (s) por actividad, los resultados se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1,0 [m] en gravas

Actividad	Rendimiento promedio [m/h]	s [m/h]
Excavación	0,52	0,15
Perfilado Marco	2,17	1,20
Sello	1,20	0,57
Mallado entre Marcos	1,19	0,48
Instalación de Marco	0,93	0,24
Hormigón Proyectado	0,60	0,43

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso del avance de 1,5 [m], se tiene que los tamaños de las muestras son menores a 30, por lo que es necesario realizar la prueba Kolmorov-Smirnov en cada una de las actividades, con el propósito de determinar si estas proceden de una población que se distribuye normalmente, este procedimiento se puede observar en el Anexo E: Prueba de Kolmorov-Smirnov del presente trabajo.

Como resultado de la prueba se obtuvo que solo las actividades de excavación y hormigón proyectado se comportan de forma normal. Se procede a calcular el rendimiento medio y la desviación estándar por cada actividad. Los resultados se observan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1,5 [m] en gravas

Actividad	Rendimiento promedio [m/h]	s [m/h]
Excavación	0,68	0,27
Hormigón Proyectado	0,76	0,38

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Finos

Análogo al caso de las gravas, se aplicó la metodología Z-Score para identificar y descartar valores atípicos. Estos se encuentran destacados de color rojo en el Anexo E del presente trabajo.

A continuación, en las Tabla 4-5 y Tabla 4-6 se presentan resúmenes de la cantidad de datos restantes para cada actividad relacionada con los finos, correspondientes a los avances de 1 [m] y 1,5 [m], después de aplicar el criterio de exclusión de valores atípicos.

Tabla 4-5: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1 [m] en finos

Avance	Cantidad de Datos Medidos
Excavación	19
Perfilado Marco	18
Sello	19
Mallado entre Marcos	20
Instalación de Marco	19
Hormigón Proyectado	18

Fuente: Anexo D (Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago)

Tabla 4-6: Cantidad de datos utilizados proyecto Metro de Santiago, avance 1,5 [m] en finos

Avance	Cantidad de Datos Medidos
Excavación	64
Perfilado Marco	65
Sello	62
Mallado entre Marcos	65
Instalación de Marco	61
Hormigón Proyectado	64

Fuente: Anexo D (Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago)

Para el caso del avance de 1 [m], se tiene que los tamaños de las muestras son menores a 30, por lo que es necesario realizar la prueba Kolmorov-Smirnov en cada una de las actividades, con el propósito de determinar si estas proceden de una población que se distribuye normalmente, este procedimiento se puede observar en el Anexo D del presente trabajo.

Como resultado de la prueba se obtuvo que todas las actividades se comportan de forma normal. Se procede a calcular el rendimiento medio y la desviación estándar por cada actividad. Los resultados se observan en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1 [m] en finos

Actividad	Rendimiento promedio [m/h]	s [m/h]
Excavación	0,50	0,10
Perfilado Marco	1,07	0,46
Sello	1,22	0,55
Mallado entre Marcos	1,05	0,59
Instalación de Marco	0,74	0,23
Hormigón Proyectado	0,41	0,07

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso del avance de 1,5 [m], donde los tamaños de las muestras son $N > 30$, se puede asumir que los datos se comportan según una distribución t de Student, la cual se aproxima a una distribución normal estándar. Se realizaron histogramas para cada una de las actividades utilizando el software IBM SPSS Statistics, los cuales se pueden observar en el Anexo F del presente trabajo.

Se procede al cálculo del valor del rendimiento promedio y la desviación estándar (s) por actividad para el avance de 1 [m] en finos, los resultados se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades, avance 1,5 [m] en finos

Actividad	Rendimiento promedio [m/h]	s [m/h]
Excavación	0,61	0,24
Perfilado Marco	2,14	0,84
Sello	1,92	0,61
Mallado entre Marcos	1,34	0,46
Instalación de Marco	1,18	0,44
Hormigón Proyectado	0,70	0,29

Fuente: Elaboración Propia

5 Resultados aplicación del Método

5.1 Gravas

Con los valores de la Tabla 4-3 es posible obtener la estimación de los rendimientos de las actividades utilizando la metodología presentada por Roberto Ferrada. El cálculo se realizará asumiendo tres niveles de confianza diferentes: 85%, 90% y 95%. Dado que la cantidad de muestras es mayor a 30, los valores del factor estadístico t se obtiene consultando la Tabla 2-1.

Utilizando la ecuación 2.11 y sustituyendo los valores de los rendimientos promedio y las desviaciones estándar, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1 [m] en gravas

Actividad	r [m/h] (80%)	r [m/h] (90%)	r [m/h] (95%)
Excavación	0,40	0,33	0,27
Perfilado Marco	1,16	0,63	0,20
Sello	0,72	0,47	0,26
Mallado entre Marcos	0,78	0,57	0,39
Instalación de Marco	0,73	0,62	0,54
Hormigón Proyectado	0,24	0,05	-0,11

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, con los resultados de la Tabla 4-4, es posible obtener la estimación de los rendimientos de las actividades para el caso del avance de 1,5 [m]. El factor estadístico t varía dependiendo de la cantidad de datos por muestra y su valor se obtiene consultando la Tabla B-0-3, del Anexo B: Factor estadístico del presente trabajo.

Utilizando la ecuación 2.11 y sustituyendo los valores de los rendimientos promedio y las desviaciones estándar, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1,5 [m] en gravas

Actividad	r [m/h] (80%)	r [m/h] (90%)	r [m/h] (95%)
Excavación	0,45	0,33	0,23
Hormigón Proyectado	0,44	0,26	0,11

5.2 En finos

Con los resultados presentados en la Tabla 4-7 es posible obtener la estimación de los rendimientos de las actividades. El cálculo se realizará asumiendo tres niveles de confianza diferentes: 85%, 90% y 95%. El factor estadístico t varía dependiendo de la cantidad de datos por muestra y su valor se obtiene consultando la Tabla B-0-3, del Anexo B del presente trabajo.

Utilizando la ecuación 2.11 y sustituyendo los valores de los rendimientos promedio y las desviaciones estándar, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1 [m] en finos

Actividad	r [m/h] (80%)	r [m/h] (90%)	r [m/h] (95%)
Excavación	0,41	0,36	0,32
Perfilado Marco	0,68	0,46	0,28
Sello	0,75	0,49	0,27
Mallado entre Marcos	0,54	0,26	0,03
Instalación de Marco	0,54	0,43	0,34
Hormigón Proyectado	0,35	0,32	0,29

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, con los resultados de la Tabla 4-8, es posible obtener la estimación de los rendimientos de las actividades para el caso del avance de 1,5 [m]. El factor estadístico t corresponde al caso cuando $N > 30$ y su valor se obtiene consultando la Tabla 2-1.

Utilizando la ecuación 2.11 y sustituyendo los valores de los rendimientos promedio y las desviaciones estándar, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 5-4

Tabla 5-4: Rendimiento estimado para actividades, para avance 1,5 [m] en finos

Actividad	r [m/h] (80%)	r [m/h] (90%)	r [m/h] (95%)
Excavación	0,41	0,30	0,22
Perfilado Marco	1,43	1,06	0,76
Sello	1,40	1,13	0,91
Mallado entre Marcos	0,95	0,75	0,59
Instalación de Marco	0,82	0,62	0,46
Hormigón Proyectado	0,46	0,33	0,22

Fuente: Elaboración Propia

Se evidencia que, al emplear un nivel de confianza del 95% para el avance de 1 [m] en gravas, uno de los valores estimados para el rendimiento de una actividad arrojó un resultado negativo (señalado en rojo). Además, bajo este nivel de confianza, los resultados son considerablemente menores que cualquier dato registrado previamente en el proyecto. Esta discrepancia genera una alta incertidumbre en torno a las estimaciones de los rendimientos, lo cual justifica la prudencia de descartar estos resultados al considerar un nivel de confianza del 95%. Esta acción garantiza la exclusión de estimaciones poco fiables en la planificación del proyecto, mitigando así el riesgo de tomar decisiones erróneas o poco fundamentadas.

En simples palabras a partir de ahora, se estudiarán los casos cuando el nivel de confianza sea del 90% y 80%.

6 Variabilidad de los rendimientos

Considerando un nivel de confianza del 80%, y los valores del rendimiento medio y el rendimiento esperado del caso de avance de 1[m] en gravas, se procede a calcular el valor de la variabilidad entre estos. Tales resultados se exponen en la Tabla 6-1 .

Tabla 6-1: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en gravas. Nivel de confianza 80%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,52	0,40	24%
Perfilado Marco	2,17	1,16	47%
Sello	1,20	0,72	40%
Mallado entre Marcos	1,19	0,78	34%
Instalación de Marco	0,93	0,73	21%
Hormigón Proyectado	0,60	0,24	60%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 6-2 se muestran los resultados tras realizar el mismo procedimiento, pero esta vez considerando un nivel de confianza del 90%.

Tabla 6-2: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en gravas. Nivel de confianza 90%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,52	0,33	37%
Perfilado Marco	2,17	0,63	71%
Sello	1,20	0,47	61%
Mallado entre Marcos	1,19	0,57	52%
Instalación de Marco	0,93	0,62	33%
Hormigón Proyectado	0,60	0,05	92%

Fuente: Elaboración Propia

En las Tabla 6-3 y Tabla 6-4 se muestran los resultados asociados al avance de 1,5 [m] en gravas, considerando un nivel de confianza del 80% y 90%, respectivamente.

Tabla 6-3: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en gravas. Nivel de confianza 80%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,68	0,45	34%
Hormigón proyectado	0,76	0,44	42%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-4: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en gravas. Nivel de confianza 90%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,68	0,33	52%
Hormigón proyectado	0,76	0,26	65%

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestran los resultados considerando un nivel de confianza del 80%, en el caso de avance de 1[m] en finos, se procede a calcular el valor de la variabilidad entre estos. Tales resultados se exponen en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en finos. Nivel de confianza 80%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,50	0,41	17%
Perfilado Marco	1,07	0,68	37%
Sello	1,22	0,75	39%
Mallado entre Marcos	1,05	0,54	48%
Instalación de Marco	0,74	0,54	27%
Hormigón Proyectado	0,41	0,35	15%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 6-6 se muestran los resultados tras realizar el mismo procedimiento, pero esta vez considerando un nivel de confianza del 90%.

Tabla 6-6: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1 [m] en finos. Nivel de confianza 90%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,50	0,36	27%
Perfilado Marco	1,07	0,46	57%
Sello	1,22	0,49	60%
Mallado entre Marcos	1,05	0,26	75%
Instalación de Marco	0,74	0,43	42%
Hormigón Proyectado	0,41	0,32	23%

Fuente: Elaboración Propia

En las Tabla 6-7 y Tabla 6-8 se muestran los resultados asociados al avance de 1,5 [m] en finos, considerando un nivel de confianza del 80% y 90%, respectivamente.

Tabla 6-7: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en finos. Nivel de confianza 80%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,61	0,41	33%
Perfilado Marco	2,14	1,43	33%
Sello	1,92	1,40	27%
Mallado entre Marcos	1,34	0,95	29%
Instalación de Marco	1,18	0,82	31%
Hormigón Proyectado	0,70	0,46	35%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6-8: Variabilidad de estimación de rendimientos, avance 1,5 [m] en finos. Nivel de confianza 90%

Actividad	r_m [m/h]	r [m/h]	Variabilidad [%]
Excavación	0,61	0,30	50%
Perfilado Marco	2,14	1,06	50%
Sello	1,92	1,13	41%
Mallado entre Marcos	1,34	0,75	44%
Instalación de Marco	1,18	0,62	47%
Hormigón Proyectado	0,70	0,33	53%

Fuente: Elaboración Propia

7 Análisis y Discusión de Resultados

En primer lugar, se encontró que algunas actividades se comportan muy similar a una distribución normal, mientras que otras requieren pruebas adicionales para verificar su comportamiento. Esto sugiere que la naturaleza de las actividades puede influir en la distribución de los datos y la precisión de los análisis realizados. En este contexto, las actividades se caracterizan por ser parte de un ciclo y por lo mismo, reiterativas.

Para realizar un análisis detallado de los datos, se consideraron distintas actividades, las cuales se registraron dependiendo del tipo de suelo (gravas vs. finos) y del paso de trabajo (1 [m] vs. 1,5 [m]).

Al analizar las tablas del capítulo 4, se observan diferencias en el rendimiento promedio y las desviaciones entre las actividades relacionadas con gravas y finos. Por ejemplo, para el caso de avance de 1 [m], las actividades relacionadas con finos parecen tener rendimientos promedio más bajos, pero con desviaciones estándar más estrechas en comparación con las actividades relacionadas con gravas.

Los resultados indican que algunas actividades muestran un rendimiento consistente y predecible, observando desviaciones estándar bajas, como en el caso de la excavación. Por otro lado, se observan desviaciones estándar más altas en actividades como el perfilado de marco en gravas, lo que indica una mayor variabilidad en el rendimiento en comparación con otras actividades.

En cuanto a lo obtenido en el capítulo 5, si se analiza las estimaciones de tales rendimientos, se destaca una tendencia consistente: al aumentar el nivel de confianza del 80% al 90%, se observa un incremento en la variabilidad en la estimación de rendimientos en todas las actividades y condiciones de suelo. Esta relación sugiere que, al buscar un mayor nivel de certeza en las estimaciones, la incertidumbre asociada también aumenta.

Para el nivel de confianza del 80%, se evidencia una variabilidad significativa en las estimaciones de rendimiento para actividades tanto en gravas como en finos. En el caso de las gravas, se observa una divergencia entre el rendimiento medio y esperado con porcentajes que oscilan entre el 21% y el 60%. Mientras tanto, las actividades en finos muestran una variabilidad menor, con valores entre el 15% y el 48%. Esta disparidad indica una mayor seguridad en las estimaciones de rendimiento para los finos debido a una posible homogeneidad en las propiedades del material (siendo esta una suposición).

Por otro lado, para el nivel de confianza del 90%, se observa un aumento general en la variabilidad tanto para gravas como para finos. En el caso de las gravas la variabilidad oscila entre el 33% y el 92%, lo que indica una mayor discrepancia entre el rendimiento medio y el rendimiento esperado. Por otro lado, en el caso de los finos las variabilidades oscilan entre el 23% y el 60%.

Otro elemento que llama la atención es la actividad de ejecución de Hormigón Proyectado, la cual muestra consistentemente la mayor variabilidad en todos los casos, lo que sugiere que puede ser una actividad especialmente difícil de estimar con precisión, y posiblemente requiera más atención en su planificación.

A continuación, en las Tabla 7-1 y Tabla 7-2, se muestran los promedios de la variabilidad de los rendimientos, se puede observar que este es independiente del avance puesto a que los porcentajes se asemejan.

Tabla 7-1: Variabilidad promedio de rendimientos de actividades para un nivel de confianza del 80%

	Avance de 1 [m]	Avance 1,5 [m]
Gravas	38%	38%
Finos	31%	31%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7-2: Variabilidad promedio de rendimientos de actividades para un nivel de confianza del 90%

	Avance de 1 [m]	Avance 1,5 [m]
Gravas	58%	58%
Finos	47%	48%

Fuente: Elaboración Propia

Un aspecto relevante es la diferencia en la variabilidad entre suelos de gravas y finos. En general, se observa que este porcentaje tiende a ser mayor en las gravas, independientemente del nivel de confianza o la longitud del avance. Esto indica que la naturaleza del suelo puede desempeñar un papel significativo en la precisión de las estimaciones de rendimientos.

8 Conclusiones

La metodología desarrollada para analizar las desviaciones en la duración de actividades realizada por Ferrada (2019), se aplicó en este caso para evaluar rendimientos. Y conforme a los objetivos de la memoria, se verifica que las variabilidades de los rendimientos de actividades son similares a las variabilidades de la duración de actividades para un mismo tipo de actividad.

A nivel general, se establece que los rendimientos estimados son inferiores a los rendimientos medios de cada muestra, dado que así se considera el escenario menos favorable (menor rendimiento) al planificar las actividades. Este enfoque asegura el cumplimiento de los plazos establecidos gracias a una planificación que contempla un margen de rendimiento conservador. Esto proporciona períodos de trabajo más amplios, lo que aumenta considerablemente la probabilidad de cumplir con los plazos previstos. Si se requiere contar con plazos más ajustados, se requieren rendimientos superiores, lo que hace necesario asignar una mayor cantidad de recursos para garantizar el cumplimiento de los plazos.

Algo importante que se debe considerar, es que utilizar diferentes niveles de confianza afecta la forma en que se interpreta los resultados del seguimiento y control del proyecto. Con un nivel de confianza más alto, se podría tener una mayor confianza en los rendimientos reales y estar más seguro de que el proyecto está progresando según lo planeado. Por otro lado, un nivel de confianza más bajo podría llevar a una mayor vigilancia.

El estudio y análisis de las desviaciones en los rendimientos no solo contribuyen al conocimiento académico en el campo de la ingeniería civil, sino que también tienen un impacto directo en terreno. Proporcionan herramientas y enfoques prácticos para mejorar la gestión y ejecución de proyectos de construcción, lo que a su vez puede conducir a mejores resultados y mayores niveles de satisfacción del cliente

A nivel específico de la ejecución de sostenimientos de túneles interestación del Metro de Santiago, se observan diferencias importantes entre las actividades según el tipo de suelo y el tamaño del avance de trabajo. Estas diferencias pueden ser causadas por varios factores, como las condiciones del terreno, el equipo utilizado y la habilidad del personal. Es crucial reconocer estas diferencias para poder tomar medidas específicas que reduzcan la incertidumbre y mejoren la eficiencia en la realización de las actividades.

Bibliografía

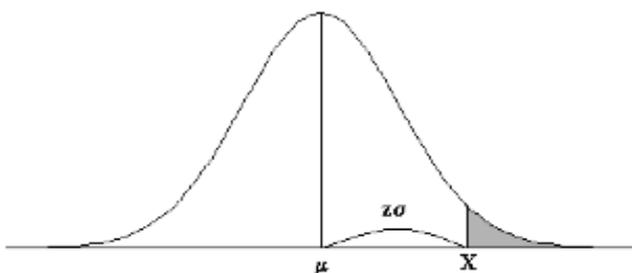
- Botero, L. F. F. B. (2002). Análisis de rendimientos y consumos de mano de obra en actividades de construcción. Revista Universidad EAFIT.
- Consuegra, J. G. (2002). Presupuestos de construcción. Segunda Edición. Bhandar editores. Bogotá, Colombia.
- Ferrada, R. (2019). Análisis de desviaciones en la estimación de la duración de actividades en proyectos de ingeniería civil. Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Project Management Institute. (PMI) (2013). A Guide to the Project Management Body of Knowledge. (PMBOK guide). Fifth Edition. Newtown Square, Pa.: Project Management Institute.
- Spiegel, M. R., & Stephens, L. J. (2009). Estadística. Cuarta Edición. México: Mc Graw Hill
- Triola, M. F.(2018). Estadística. Decimosegunda edición. México: Pearson Edicación inc.
- Cortez, R. (2016) Apuntes de clase MA3403 Probabilidades y Estadísticas. Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile
- IBM Corp. (2011) IBM SPSS Statistics Base 20. Estados Unidos.
- INN-Chile. Hormigón - Evaluación estadística de la Resistencia mecánica, Norma Chilena Oficial NCh1998.Of1989
- Walpole, R. E, Myers, R. H., & Myers, S.L. (1998) *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Sexta Edición. México: Pearson Educación.

Anexos

Anexo A: Tablas de Distribuciones

Tabla A-0-1: Tabla Distribución Normal

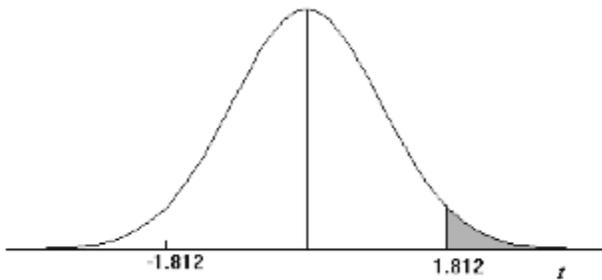
Áreas bajo la curva normal



Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

Fuente: Cortez (2016)

Tabla A-0-2: Tabla Distribución T de Student
Puntos de porcentaje de la distribución t



α Γ	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290

Fuente: Cortez (2016)

Anexo B: Factor estadístico t

Tabla B-0-3: Valores factor estadístico t

Número de muestras	Fracción defectuosa, %		
	5	10	20
3	2,920	1,886	1,061
4	2,353	1,638	0,978
5	2,132	1,533	0,941
6	2,015	1,476	0,920
7	1,943	1,440	0,906
8	1,895	1,415	0,896
9	1,860	1,397	0,889
10	1,833	1,383	0,883
11	1,812	1,372	0,879
12	1,796	1,363	0,876
13	1,782	1,356	0,873
14	1,771	1,350	0,870
15	1,761	1,345	0,868
16	1,753	1,341	0,866
17	1,746	1,337	0,865
18	1,740	1,333	0,863
19	1,734	1,330	0,862
20	1,729	1,328	0,861
21	1,725	1,325	0,860
22	1,721	1,323	0,859
23	1,717	1,321	0,858
24	1,714	1,319	0,858
25	1,711	1,318	0,857
26	1,708	1,316	0,856
27	1,706	1,315	0,856
28	1,703	1,314	0,855
29	1,701	1,313	0,855
30 ó más	1,645	1,282	0,842

Fuente: NCh1988.Of89

Anexo C: Método Z-scores

Los z-scores permiten estimar cuántas desviaciones estándar un punto de datos está por encima o por debajo de la media. Los puntos de datos con z-scores por encima de un cierto umbral se consideran atípicos y pueden ser descartados.

Para estimar y detectar los valores atípicos, se debe seguir los siguientes pasos para cada una de las muestras:

- Calcular la media y la desviación estándar de la muestra.
- Calcular los z- scores para cada valor, utilizando la siguiente expresión:

$$Z_{SCORE} = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Donde:

X es el valor individual de la muestra.

μ es la media de la muestra.

σ es la desviación estándar de la muestra.

- Establecer un umbral para identificar valores atípicos. Comúnmente, se usa un z-score de ± 2 o ± 3 desviaciones estándar, para efectos de este trabajo se considerará un umbral de ± 2 .
- Identificar los valores atípicos y descartarlos.

En primer lugar, se calcula la media muestral y la desviación estándar de cada actividad en el caso de gravas, considerando si el avance es de 1 [m] o 1,5 [m], tal como se muestra en la Tabla C-0-4.

Tabla C-0-4: Rendimiento promedio y desviación estándar actividades en gravas

Actividad	Avance 1 [m]		Avance 1,5 [m]	
	μ [m/h]	s [m/h]	μ [m/h]	s [m/h]
Excavación	0,57	0,21	0,68	0,27
Perfilado Marco	2,17	1,20	1,94	0,68
Sello	1,20	0,57	1,70	0,4
Mallado entre Marcos	1,19	0,48	1,56	0,52
Instalación de Marco	0,96	0,29	1,33	0,32
Hormigón Proyectado	0,7	0,7	0,85	0,59

Fuente: Elaboración propia

Se procede a calcular el valor absoluto de los z-score e identificar aquellos mayores a 2 para luego poder descartarlos. En la Tabla C-0-5 se exponen los resultados para el avance de 1 [m], destacando en rojo aquellos valores atípicos.

Tabla C-0-5: Z-scores de los valores de cada actividad, caso avance de 1 [m] en gravas

Excavación	Perfilado	Sello	Mallado	Instalación	Hormigón Proyectado
0,36	0,15	0,35	0,31	0,15	0,72
1,57	1,26	1,41	1,42	1,30	0,43
0,36	0,15	0,94	1,07	0,53	0,04
0,36	0,98	0,35	0,31	0,15	0,47
1,49	0,98	0,24	0,38	0,53	0,28
1,29	0,15	0,94	0,38	0,15	0,42
1,29	0,15	1,33	0,38	0,15	0,55
1,16	1,26	1,23	0,38	3,59	0,18
0,44	0,15	0,70	0,80	0,53	0,47
0,44	0,15	0,70	1,63	0,15	0,52
0,63	0,15	1,41	0,38	0,15	0,36
1,16	0,70	0,35	1,07	0,15	0,42
0,44	1,52	0,70	0,38	0,15	0,42
0,84	0,98	0,70	0,80	1,32	0,36
0,44	0,98	0,94	0,31	1,30	0,52
0,36	0,70	0,24	0,31	0,15	0,04
0,02	0,70	1,23	1,42	0,15	0,18
0,84	0,98	1,23	0,31	0,53	0,42
0,44	0,70	0,24	0,38	0,99	0,91
0,84	1,14	0,94	0,80	0,53	0,43
0,44	0,15	1,41	0,31	0,53	0,15
0,44	0,15	0,94	1,63	1,56	0,28
0,36	0,15	0,35	0,38	0,15	0,43
0,02	0,15	0,24	0,31	0,53	0,42
1,09	0,15	1,41	0,38	0,53	0,47
1,02	0,70	0,24	0,31	0,53	1,86
0,36	0,70	0,24	0,38	0,53	0,04
0,02	0,70	0,24	0,31	0,99	4,71
0,44	1,52	1,41	1,69	1,32	0,63
1,09	1,52	1,41	0,31	1,32	0,47
0,44	1,52	0,24	0,38	0,15	0,43
2,05	1,52	1,41	1,69	0,15	0,47
0,02	1,52	0,70	1,69	0,53	0,66

2,05	1,52	1,41	1,69	1,30	0,42
2,05	1,52	1,41	1,69	1,30	0,61
0,02	1,52	1,41	1,69	1,30	1,86
2,05	1,52	1,41	1,69	1,30	0,36

Fuente: Elaboración propia

Se identifican los valores que corresponden a cada z-score y se descartan aquellos que superan el umbral establecido, quedando lo expuesto en el Anexo D: Datos Ejecución Sostenimiento Túnel de Metro.

Este procedimiento se resumió únicamente para el caso del avance de 1 [m] en gravas. Los resultados para los demás casos se presentan en el Anexo D: Datos Ejecución Sostenimiento Túnel de Metro, donde los valores considerados atípicos y no representativos se destacan en color rojo. Estos no se consideraron para resultados posteriores.

Anexo D: Datos Ejecución Sostenimiento Túnel de Metro

Avance 1 m en gravas

Tabla D-0-6: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1,0 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
0,50	0,31	0,44	0,50	0,67	0,36	0,80	1,00
0,25	0,31	0,33	0,57	0,67	0,50	0,67	1,00
0,50	0,33	0,67	0,40	0,50	0,57	1,00	0,57
0,50	0,67	0,40	0,67	0,57	0,67	0,57	1,00
0,27	0,67	0,67	0,40	0,80			

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-7: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1,0 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
2,00	2,00	2,00	1,33	2,00	1,33	4,00	4,00
0,67	2,00	1,33	1,33	2,00	1,33	4,00	4,00
2,00	0,67	4,00	1,00	2,00	1,33	4,00	4,00
1,00	2,00	1,00	1,33	2,00	4,00	4,00	4,00
1,00	2,00	1,00	0,80	2,00			

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-8: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1,0 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,00	0,67	2,00	1,33	2,00	1,33	2,00	2,00
0,40	0,44	1,00	0,50	0,67	1,33	1,33	2,00
0,67	0,50	0,80	0,50	1,00	1,33	2,00	2,00
1,00	0,80	0,80	1,33	1,33	2,00	0,80	2,00
1,33	0,80	0,67	0,67	2,00			

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-9: Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1,0 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,33	1,00	1,00	1,33	1,33	1,33	1,33	2,00
0,50	1,00	0,67	0,50	0,40	1,00	1,00	2,00
0,67	1,00	1,00	1,33	1,00	1,33	2,00	2,00
1,33	0,80	0,80	1,00	1,33	2,00	2,00	2,00
1,00	0,40	1,33	0,80	1,00			

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-10: Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1,0 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,57	1,33
1,33	1,00	1,00	1,00	0,50	0,80	1,00	1,33
0,80	2,00	1,00	0,80	1,00	0,67	1,00	1,33
1,00	0,80	0,57	0,67	0,80	0,57	0,80	1,33
0,80	1,00	1,33	0,80	0,80			

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-11: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1,0 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
0,19	0,40	0,44	0,67	0,80	2,00	0,36	0,40
1,00	0,31	0,40	0,57	0,50	0,67	1,00	0,27
0,67	0,57	0,40	0,40	1,00	4,00	0,36	2,00
0,36	0,36	0,44	1,33	0,40	0,25	0,24	0,44
0,50	0,33	0,33	1,00	0,36			

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Avance 1,5 m en gravas

Tabla D-0-12: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1,5 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
0,50	0,86	0,86	1,20	0,50	0,75	0,60	0,55
0,67	0,55	1,20	0,86	0,55	0,24	0,50	0,75
0,46	1,20	1,00	0,43	0,50	0,40	0,50	0,75

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-13: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1,5 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,50	1,50	1,20	1,50	1,50	2,00	3,00	1,50
0,86	2,00	2,00	2,00	3,00	1,50	1,50	3,00
1,50	3,00	2,00	3,00	1,50	1,50	1,50	3,00

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-14: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1,5[m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,50	2,00	1,20	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,50	3,00	1,50
1,50	2,00	1,50	2,00	1,50	1,50	1,50	1,00

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-15 : Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1,5 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,20	1,50	1,00
3,00	1,50	2,00	2,00	0,86	1,50	1,50	1,00
3,00	1,50	1,50	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-16: : Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1,5 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,20	1,50	1,00
1,50	1,50	2,00	1,20	0,60	0,86	1,50	1,00
1,50	1,00	1,50	1,50	0,75	1,20	1,50	1,50

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-17: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1,5 [m], en gravas

Rendimiento [m/h]							
1,20	1,00	0,86	0,75	0,60	0,60	0,75	0,50
1,20	0,67	0,60	0,46	0,55	0,46	0,46	0,50
3,00	1,50	1,50	0,50	0,25	1,50	0,60	0,43

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Avance 1 m en finos

Tabla D-0-18: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
0,50	0,67	0,50	0,44	0,57	0,33	0,50	0,67
0,50	0,50	0,57	0,40	0,50	0,44	0,50	0,33
0,67	0,50	0,36	0,80				

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla 0-19: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
1,00	1,00	1,00	1,00	1,33	0,29	1,33	1,00
1,00	1,00	4,00	0,33	0,67	2,00	0,67	4,00
1,33	1,00	2,00	1,33				

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-20: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
1,33	1,00	2,00	2,00	1,33	1,00	0,80	0,67
1,33	0,40	1,00	2,00	2,00	1,00	0,80	0,80
4,00	0,40	2,00	1,33				

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-21: Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
0,27	1,00	2,00	0,50	2,00	0,25	1,33	1,33
1,33	2,00	1,00	0,67	0,50	2,00	1,00	1,00
1,00	0,80	0,44	0,50				

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-22: Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
1,00	0,33	1,00	0,50	0,67	0,80	1,00	1,33
1,00	0,50	0,67	0,67	0,67	0,40	0,40	0,80
0,80	0,80	1,00	1,00				

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-23: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
1,00	0,40	0,36	0,44	0,40	0,29	0,33	0,29
0,50	0,36	0,44	0,40	0,29	0,40	0,50	0,40
0,80	0,50	0,50	0,44				

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Avance 1,5 m en finos

Tabla D-0-24: Rendimientos reiterativos de actividad excavación para un avance cada 1,5 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
0,75	1,00	0,43	0,75	0,67	1,50	0,75	0,43
0,75	0,75	0,50	3,00	0,60	0,55	1,00	0,43
0,60	1,20	0,50	0,50	0,46	0,46	0,43	0,43
0,75	0,46	0,40	0,43	0,46	0,43	0,43	0,55
1,20	0,50	1,20	0,40	0,60	0,46	0,46	0,46
0,60	0,50	0,75	1,00	0,60	0,46	0,55	0,43
1,20	0,67	0,60	0,50	0,60	0,60	0,50	0,67
0,60	0,46	0,30	0,46	0,60	0,43	0,60	0,50
3,00	0,43						

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-25: Rendimientos reiterativos de actividad perfilado marco para un avance cada 1,5 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
1,50	2,00	3,00	0,86	3,00	1,50	1,50	1,50
3,00	3,00	1,50	0,50	3,00	1,50	1,00	1,50
3,00	1,50	3,00	3,00	3,00	3,00	1,50	1,50
2,00	2,00	3,00	1,00	3,00	3,00	1,00	0,60
3,00	1,00	3,00	3,00	2,00	3,00	0,86	2,00
3,00	3,00	6,00	2,00	3,00	3,00	1,50	1,50
3,00	2,00	3,00	3,00	3,00	1,50	2,00	1,50
2,00	1,50	3,00	0,43	3,00	1,50	1,50	1,50
3,00	3,00						

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-26: Rendimientos reiterativos de actividad sello para un avance cada 1,5 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
6,00	1,20	2,00	1,50	1,50	3,00	1,50	1,50
2,00	2,00	2,00	6,00	2,00	2,00	1,50	6,00
2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,50	1,50	1,50
0,60	3,00	2,00	1,50	2,00	3,00	1,50	1,50
1,50	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	1,50	2,00
1,50	2,00	3,00	1,50	2,00	3,00	1,50	1,50
1,20	1,50	6,00	2,00	2,00	1,50	2,00	1,50
1,20	1,00	1,20	3,00	2,00	3,00	1,50	3,00
1,20	2,00						

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-27: Rendimientos reiterativos de actividad mallado entre marcos para un avance cada 1,5 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
2,00	1,20	2,00	2,00	1,50	1,50	0,75	1,00
0,86	0,75	1,50	2,00	1,50	2,00	1,00	0,60
0,50	1,50	1,20	2,00	1,00	2,00	0,75	1,00
0,75	2,00	2,00	0,86	1,50	1,50	1,00	1,00
0,86	0,75	1,50	2,00	1,50	1,50	1,00	1,50
2,00	1,00	2,00	1,50	1,20	2,00	1,50	1,00
1,50	2,00	1,50	2,00	1,20	0,75	0,67	1,20
1,20	1,50	1,00	3,00	1,50	0,75	1,00	1,50
1,00	1,20						

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-28: Rendimientos reiterativos de actividad instalación de marco para un avance cada 1,5 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
0,67	0,67	3,00	2,00	1,20	1,00	1,50	1,00
1,50	0,86	3,00	1,20	2,00	3,00	0,75	2,00
1,20	1,50	3,00	1,50	0,75	1,00	1,50	1,00
1,00	1,50	2,00	1,50	1,20	3,00	0,32	0,75
1,50	1,50	2,00	2,00	1,20	1,00	0,60	0,75
0,86	1,50	0,60	1,20	1,20	1,50	1,50	0,60
1,00	0,55	1,50	1,50	1,20	1,00	1,20	1,00
0,67	2,00	1,50	1,20	1,20	1,00	1,00	0,50
0,46	1,20						

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Tabla D-0-29: Rendimientos reiterativos de actividad hormigón proyectado para un avance cada 1,5 [m], en finos

Rendimiento [m/h]							
1,50	0,67	1,20	0,75	1,20	0,43	0,55	0,60
0,38	0,75	1,50	0,50	0,75	1,20	0,75	0,75
1,20	1,00	0,67	0,55	0,43	0,43	0,50	0,50
0,35	0,67	0,67	3,00	0,50	0,38	0,67	2,00
0,50	1,20	0,67	0,55	0,86	0,75	0,50	0,38
0,60	0,75	0,67	1,00	0,50	0,46	0,35	0,50
0,60	1,20	0,60	0,60	0,67	0,38	0,60	0,50
1,50	0,67	0,75	1,00	0,55	0,43	0,55	0,60
0,75	0,75						

Fuente: Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago

Anexo E: Prueba de Kolmorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar si una muestra proviene de una distribución específica. A continuación, se explican los pasos básicos para realizar una prueba de Kolmogorov-Smirnov para verificar si una muestra se distribuye normalmente:

En primer lugar, se formulan las hipótesis, las cuales son:

- Hipótesis nula (H_0): La muestra analizada sigue una distribución normal.
- Hipótesis alternativa (H_1): La muestra analizada no sigue una distribución normal.

Una forma de rechazar o aceptar las hipótesis es por medio del cálculo del valor p , o más conocido como p -value. Si p -value es mayor que el nivel de significancia seleccionado, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos se ajustan a una distribución normal. De lo contrario, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos no se distribuyen normalmente.

El nivel de significancia se representa generalmente con la letra griega " α " (alfa), y comúnmente los valores más utilizados son 0.05 y 0.01, el cual puede variar según el contexto y la naturaleza del análisis. Para motivos de este trabajo, se utilizará un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Sabiendo lo anterior se debe comprobar lo siguiente:

- Si $p\text{-value} \geq 0.05$, se acepta H_0
- Si $p\text{-value} \leq 0.05$, se rechaza H_0

Para estimar p -value de cada actividad se utiliza el software IBM SPSS Statistics, el cual otorga el valor directamente. El primer paso es introducir los datos de la muestra, para luego realizar el siguiente procedimiento:

- Dirigirse a la barra de tareas y seleccionar Analizar; Pruebas no paramétricas; Cuadros de diálogo antiguos; K-S de 1 muestra.
- Seleccionar la muestra que se desee analizar, y posteriormente seleccionar la distribución de contraste normal.

Tal procedimiento despliega una ventana idéntica a lo mostrado en la Tabla E-0-30, donde el valor de Sig. Asintót (bilateral) corresponde a p -value.

Tabla E-0-30: Ejemplo de Resultado Prueba Kolmorov-Smirnov utilizando el Software IBM SPSS Statistics 20

		Rendimiento [m/día]
N		24
Parámetros normales ^{a,b}	Media	,6825
	Desviación típica	,26601
Diferencias más extremas	Absoluta	,191
	Positiva	,191
	Negativa	-,102
Z de Kolmogorov-Smirnov		,935
Sig. asintót. (bilateral)		,347

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Fuente: IBM SPSS Statistics 20

Siguiendo la metodología explicada anteriormente, se realiza la prueba para las 6 actividades del avance de 1,5 [m] en gravas y para el avance de 1 [m] en finos, esto debido a que las muestras tienen un tamaño $N < 30$. A continuación, en las Tabla E-0-31 y Tabla E-0-32 se muestran los p-value para los casos mencionados. Se destacan en rojo aquellos que no cumplen con la hipótesis nula, es decir, las muestras asociadas a esas actividades no se distribuyen de forma normal.

Tabla E-0-31: Resultados Prueba Kolmorov-Smirnov para actividades de avance 1,5 [m], en gravas

Actividad	p-value
Excavación	0,347
Perfilado Marco	0,043
Sello	0,012
Mallado entre Marcos	0,006
Instalación de Marco	0,003
Hormigón Proyectado	0,180

Fuente: IBM SPSS Statistics

Tabla E-0-32: Resultados Prueba Kolmorov-Smirnov para actividades de avance 1 [m], en finos

Actividad	p-value
Excavación	0,283
Perfilado Marco	0,303
Sello	0,536
Mallado entre Marcos	0,528
Instalación de Marco	0,507
Hormigón Proyectado	0,690

Fuente: IBM SPSS Statistics

Anexo F: Histogramas de Actividades Proyecto de Túneles

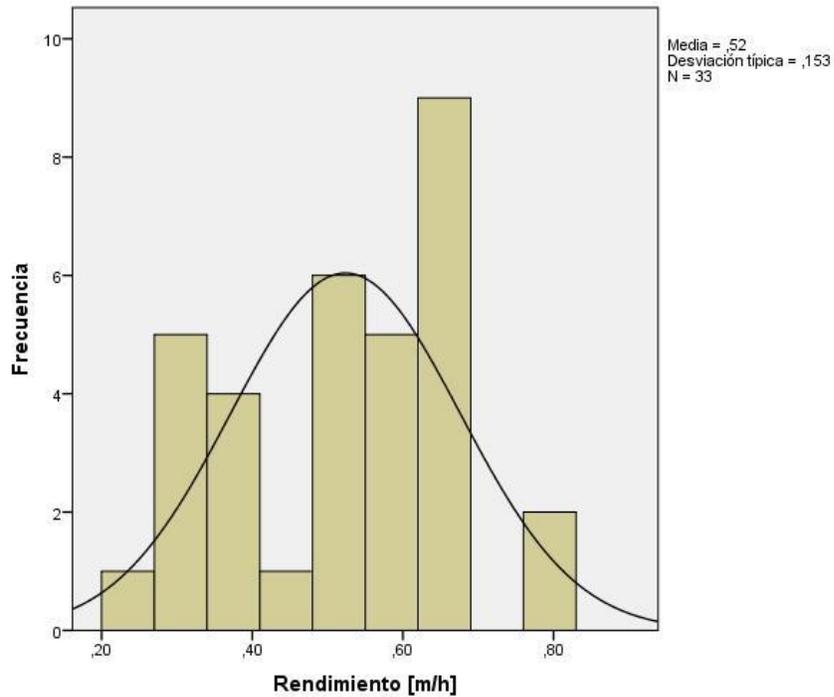


Figura F-0-1: Histograma excavación avance 1,0 [m], gravas

Fuente: IBM SPSS Statistics

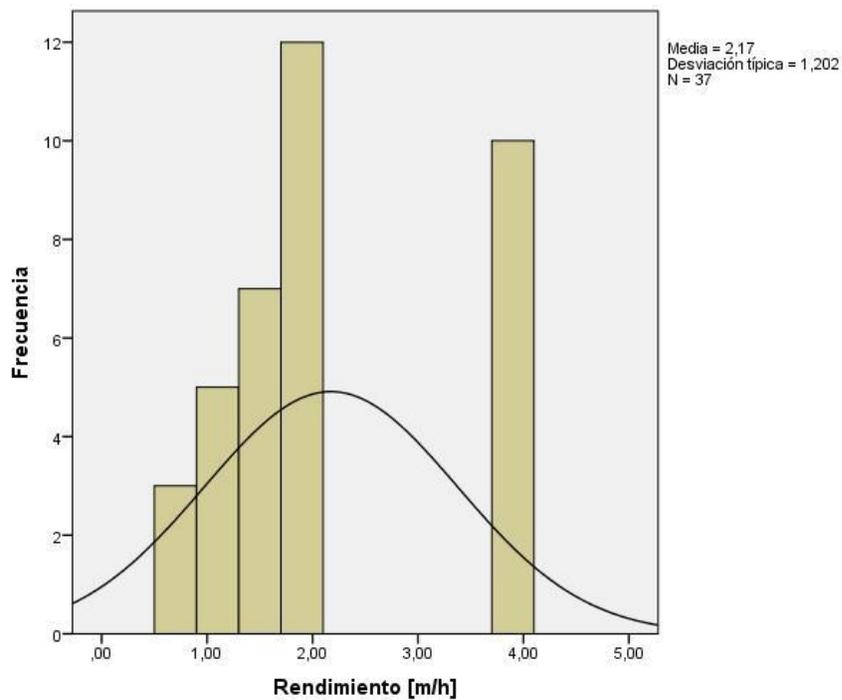


Figura F-0-2: Histograma perfilado marco avance 1,0 [m], gravas

Fuente: IBM SPSS Statistics

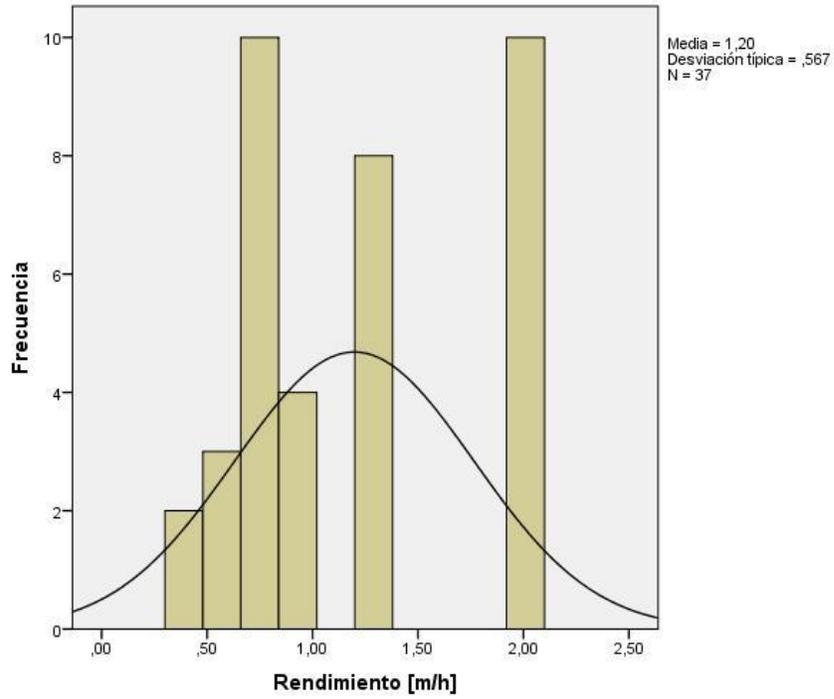


Figura F-0-3: Histograma sello avance 1,0 [m], gravas
Fuente: IBM SPSS Statistics

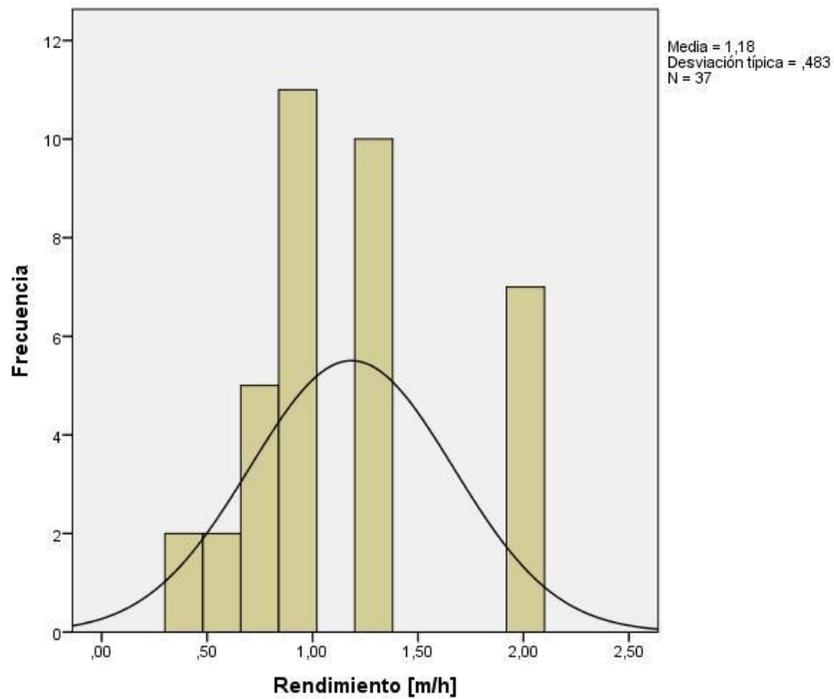


Figura F-0-4: Histograma mallado Avance 1,0 [m], gravas
Fuente: IBM SPSS Statistics

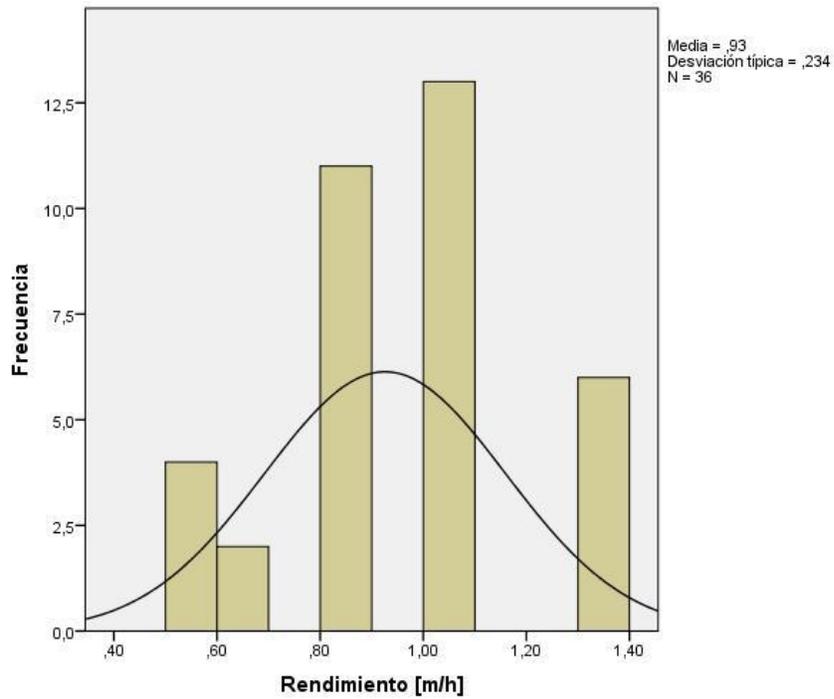


Figura F-0-5: Histograma instalación de marco Avance 1,0 [m], gravas
Fuente: IBM SPSS Statistics

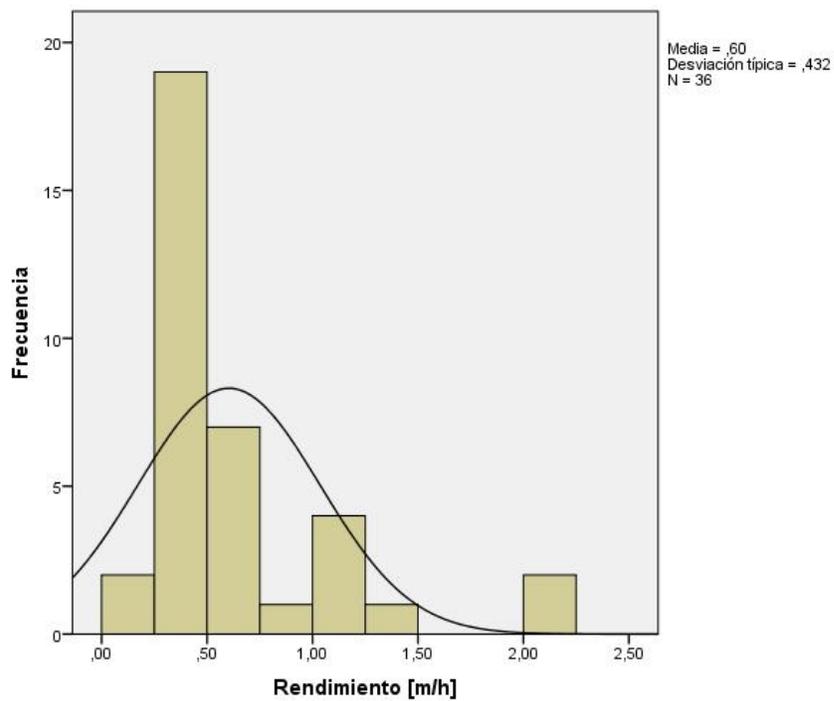


Figura F-0-6: Histograma hormigón proyectado Avance 1,0 [m], gravas
Fuente: IBM SPSS Statistics

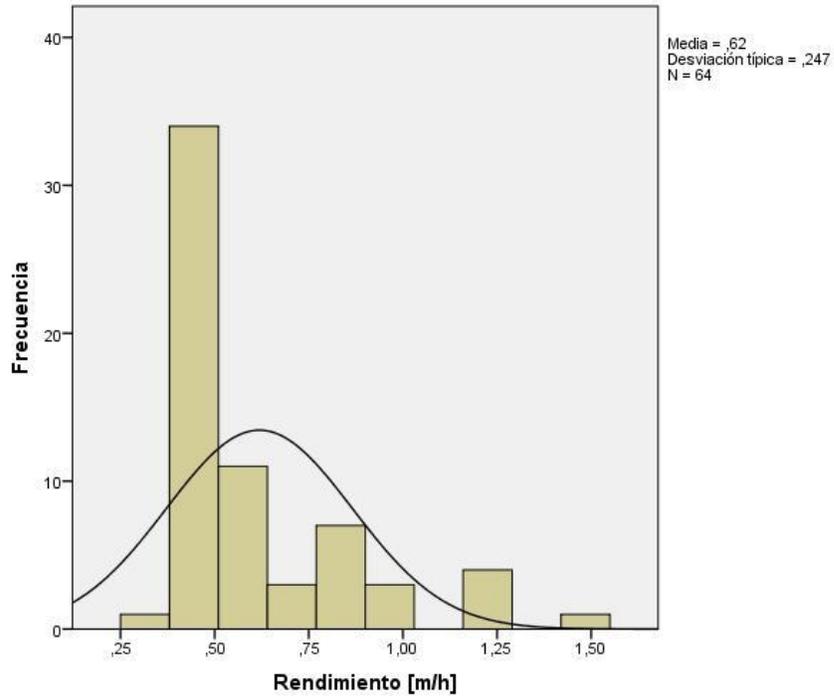


Figura F-0-7: Histograma excavación avance 1,5 [m], finos
Fuente: IBM SPSS Statistics

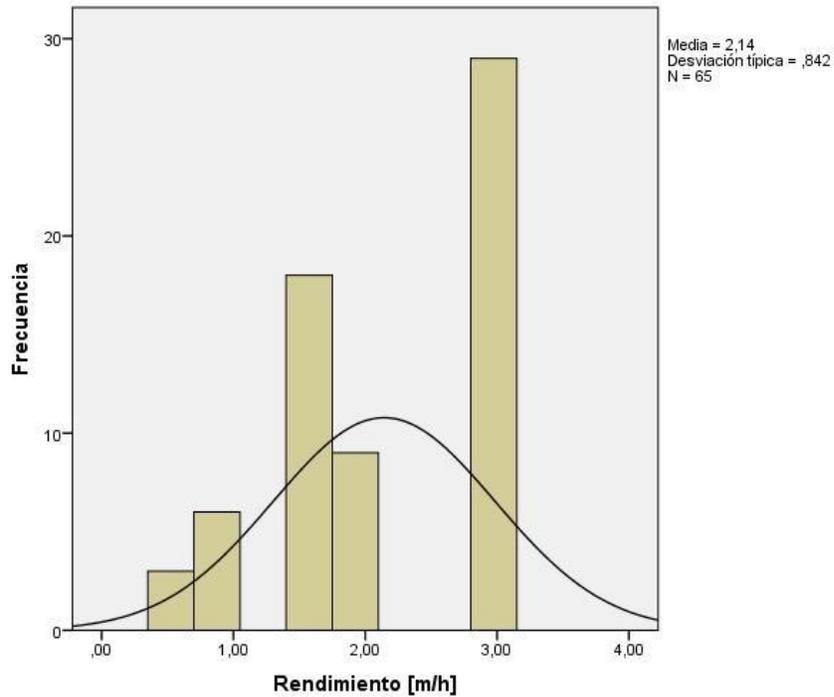


Figura F-0-8: Histograma perfilado avance 1,5 [m], finos
Fuente: IBM SPSS Statistics

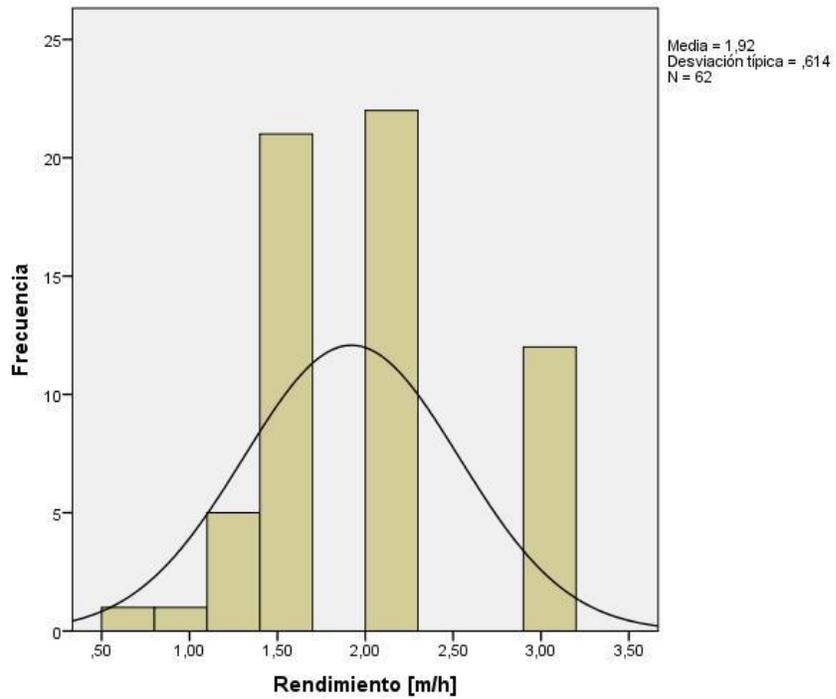


Figura F-0-9: Histograma sello avance 1,5 [m], finos
Fuente: IBM SPSS Statistics

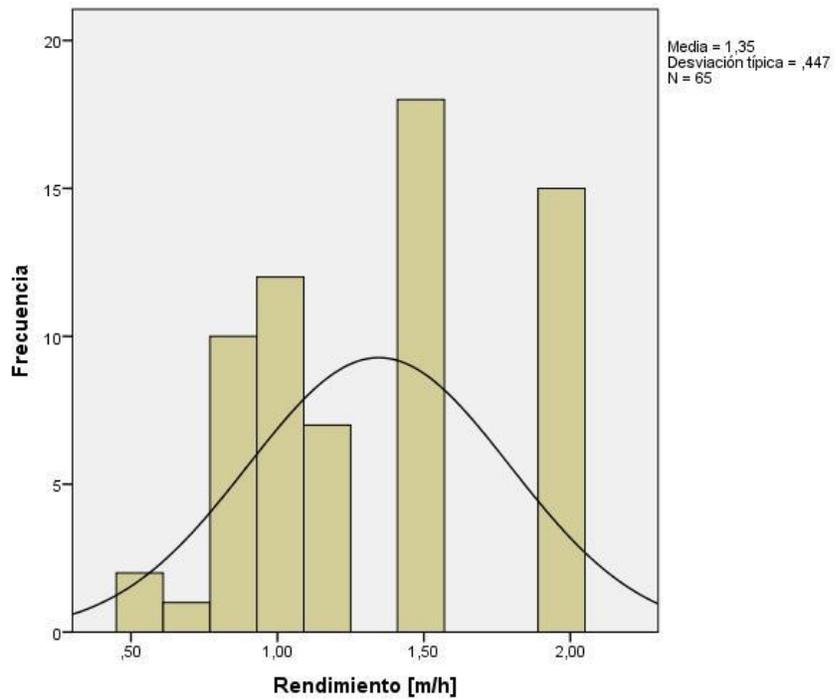


Figura F-0-10: Histograma mallado avance 1,5 [m], finos
Fuente: IBM SPSS Statistics

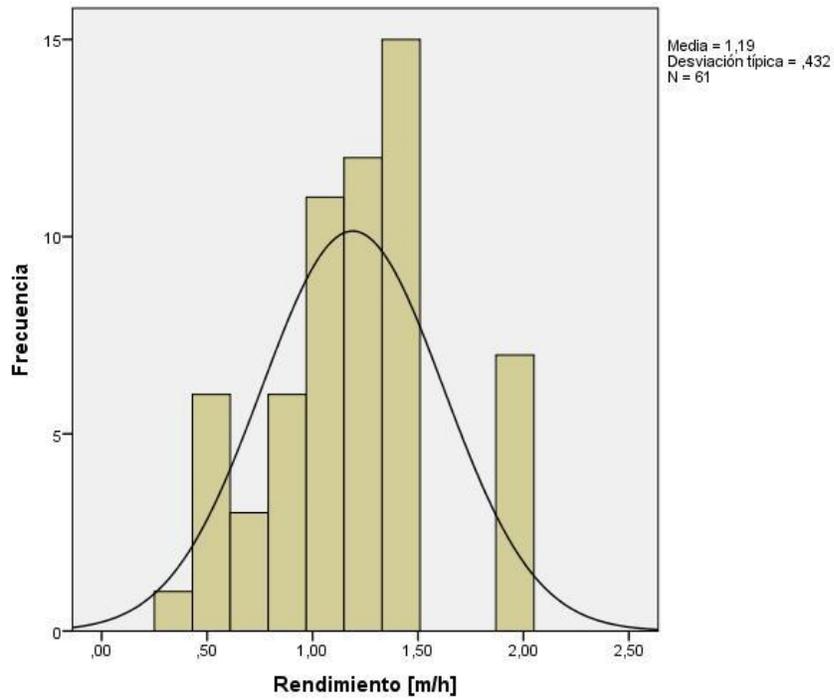


Figura F-0-11: Histograma Instalación de marco avance 1,5 [m], finos
Fuente: IBM SPSS Statistics

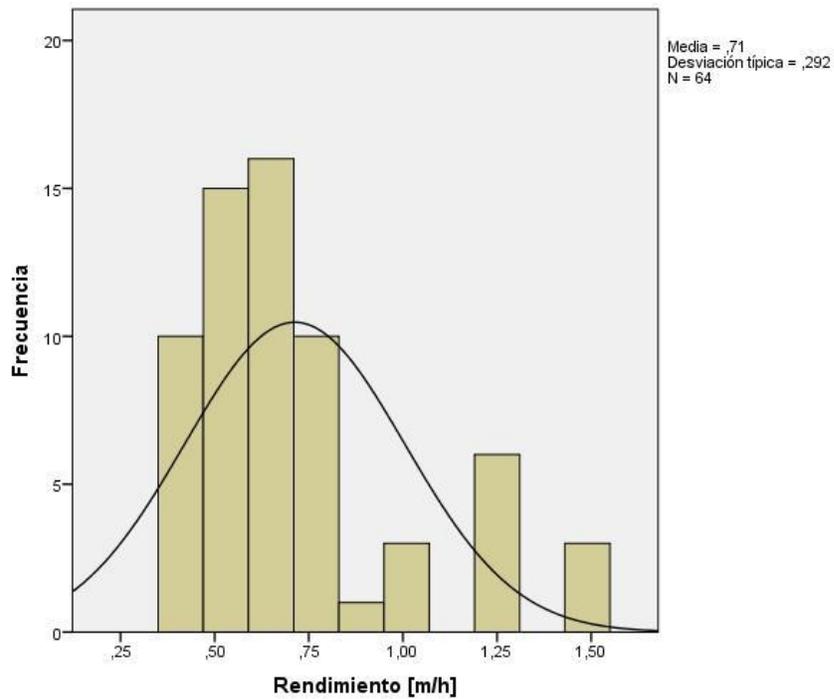


Figura F-0-12: Histograma hormigón proyectado avance 1,5 [m], finos
Fuente: IBM SPSS Statistics