

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DEPARTAMENTO**

**TOPOGRAFÍA Y VÍAS DE COMUNICACIÓN**



**“COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE LOS ENSAYOS APLICADOS  
A SUELOS GRANULARES PARA OBTENER EL COEFICIENTE  
DE PERMEABILIDAD Y CONOCER SU EFICIENCIA ÓPTIMA”**

**Por:**

**IVAN CASTRO BAUTISTA**

Proyecto presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura de Ingeniería Civil.

**Semestre II – 2022**

**TARIJA - BOLIVIA**

**DEDICATORIA:**

El presente trabajo de Proyecto de Grado está dedicado a mis padres Pedro y Gertrudis por haberme dado la fortaleza para seguir adelante. Gracias por brindarme su amor, paciencia y esfuerzo.

A mis hermanos por brindarme siempre su apoyo y sus consejos.

**ÍNDICE**  
**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

	Página
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Situación Problemática .....	2
1.2.1. Problema .....	2
1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema .....	2
1.2.3. Delimitación temporal y espacial del problema .....	2
1.3. Justificación .....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo General .....	3
1.4.2. Objetivos específicos .....	3
1.5. Hipótesis .....	4
1.6. Operacionalización de las variables .....	4
1.6.1. Variable 1 .....	4
1.6.2. Variable 2 .....	4
1.7. Identificación del tipo de investigación .....	5
1.8. Unidades de estudio y decisión muestral .....	5
1.8.1. Unidad de estudio .....	5
1.8.2. Población .....	5
1.8.3. Muestra .....	6
1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo .....	6

1.9. Métodos y técnicas empleadas.....	6
1.10. Procesamiento de la información.....	6
1.11. Alcance de la investigación.....	7

## **CAPÍTULO II**

### **PERMEABILIDAD Y SUS CONSIDERACIONES GENERALES**

	Página
2.1. Suelos granulares .....	8
2.2. Clasificación de suelos.....	9
2.3. Sistema de clasificación S.U.C.S.....	11
2.4. Permeabilidad .....	13
2.4.1. Coeficiente de permeabilidad.....	13
2.5. Factores que influyen en la permeabilidad de los suelos.....	14
2.5.1. Relación de vacíos.....	14
2.5.2. Porosidad.....	16
2.5.3. Temperatura de agua .....	17
2.5.4. Estructura del suelo .....	18
2.5.5. Agujeros y fisuras.....	19
2.5.6. Humedad del suelo .....	19
2.6. Valores del coeficiente de permeabilidad en distintos suelos.....	20
2.7. Ley de Darcy y el coeficiente de permeabilidad.....	22
2.8. Métodos para la determinación del coeficiente de permeabilidad.....	23
2.8.1. Método directo (permeámetro de carga constante) .....	24
2.8.2. Métodos indirectos (fórmulas empíricas).....	25

## **CAPÍTULO III**

### **APLICACIÓN PRÁCTICA**

	Página
3.1. Ubicación de procedencia de materiales para la investigación.....	30
3.2. Caracterización de los suelos.....	34
3.2.1. Ensayo granulometría (ASTM D422; AASHTO T88) .....	34
3.2.2. Ensayo contenido de humedad (ASTM D2216) .....	43
3.2.3. Ensayo peso específico.....	44
3.2.4. Ensayo del coeficiente de permeabilidad (ASTM D2434; AASHTO T215).....	48

## **CAPÍTULO IV**

### **COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

	Página
4.1. Porcentaje de variación .....	51
4.2. Comparación de K en suelos SW.....	52
4.2.1. Ecuación de Allen Hazen .....	52
4.2.2. Ecuación de Schlichter .....	55
4.2.3. Ecuación de Terzaghi .....	59
4.2.4. Porcentajes de variación de K en suelos SW.....	62
4.3. Comparación de K en suelos SP .....	64
4.3.1. Ecuación de Allen Hazen .....	64
4.3.2. Ecuación de Schlichter .....	67
4.3.3. Ecuación de Terzaghi .....	71
4.3.4. Porcentajes de variación de K en suelos SP .....	74
4.4. Comparacion de K en suelos GW .....	78

4.4.1. Ecuación de Allen Hazen .....	78
4.4.2. Ecuación de Schlichter .....	81
4.4.3. Ecuación de Terzaghi .....	85
4.4.4. Porcentaje de variación de K en suelos GW .....	88
4.5. Comparación de K en suelos GP .....	90
4.5.1. Ecuación de Allen Hazen .....	90
4.5.2. Ecuación de Schlichter .....	93
4.5.3. Ecuación de Terzaghi .....	97
4.5.4. Porcentajes Variación de K en suelos GP .....	100
4.6. Análisis de resultados .....	102
4.7. Ajuste de las ecuaciones Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi .....	103
4.7.1. Nuevas constantes de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi .....	103
4.8. Correlación de constantes para cada tipo de suelo .....	106
4.8.1. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo SW .....	107
4.8.2. Correlación de la constante de Schlichter para suelo SW .....	109
4.8.3. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo SW .....	111
4.8.4. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo SP .....	113
4.8.5. Correlación de la constante de Schlichter para suelo SP .....	115
4.8.6. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo SP .....	117
4.8.7. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo GW .....	119
4.8.8. Correlación de la constante de Schlichter para suelo GW .....	121
4.8.9. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo GW .....	123
4.8.10. Correlación de la constante de Allen Hazen para suelo GP .....	125
4.8.11. Correlación de la constante de Schlichter para suelo GP .....	127

4.8.12. Correlación de la constante de Terzaghi para suelo GP.....	129
4.9. Ecuaciones obtenidas de las correlaciones .....	131
4.10. Comparación de K utilizando las ecuaciones ajustadas .....	132
4.10.1. Comparación de K(ajustado) en suelos SW .....	132
4.10.2. Comparación de K(ajustado) en suelos SP .....	134
4.10.3. Comparación de K(ajustado) en suelos GW .....	138
4.10.4. Comparación de K(ajustado) en suelos GP.....	140
4.11. Análisis de Resultados .....	142
4.12. Correlación de K con factores granulométricos.....	143
4.12.1. Correlaciones de K para suelos SW .....	143
4.12.2. Correlaciones de K para suelos SP.....	145
4.12.3. Correlaciones de K para suelos GW .....	147
4.12.4. Correlaciones de K para suelos GP.....	149
4.13. Pruebas de hipótesis .....	152
4.13.1. Verificación de la hipótesis en suelo SW.....	152
4.13.2. Verificación de la hipótesis en suelo SP .....	153
4.13.3. Verificación de la hipótesis en suelo GW .....	154
4.13.4. Verificación de la hipótesis en suelo GP .....	155

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	Página
5.1. Conclusiones .....	156
5.2. Recomendaciones .....	158

### **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXO**

ANEXO 1: Guías de laboratorio

ANEXO 2: Planillas de ensayos en laboratorio del río La Victoria

ANEXO 3: Planillas de ensayos en laboratorio del río Tolomosa

ANEXO 4: Planillas de ensayos en laboratorio del río Erquis

ANEXO 5: Calibración de frascos volumétricos

ANEXO 6: Reporte fotográfico



## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 2.1</b> Granulometría .....	9
<b>Tabla 2.2</b> Símbolos empleados según S.U.C.S. ....	11
<b>Tabla 2.3</b> Clasificación de los suelos según sus coeficientes de permeabilidad .....	13
<b>Tabla 2.4</b> Relación entre la viscosidad del agua y la temperatura .....	18
<b>Tabla 2.5</b> Intervalo de valores de K (cm/seg) .....	20
<b>Tabla 2.6</b> Valores de K (cm/seg).....	21
<b>Tabla 2.7</b> Permeabilidad de los suelos en cm/seg. ....	22
<b>Tabla 2.8</b> Valores de la constante C de Allen Hazen, propuesto por varios autores.....	27
<b>Tabla 3.1</b> Coordenadas río La Victoria .....	31
<b>Tabla 3.2</b> Coordenadas río Tolomosa .....	32
<b>Tabla 3.3</b> Coordenadas río Erquis .....	33
<b>Tabla 3.4</b> Granulometría río La Victoria.....	35
<b>Tabla 3.5</b> Datos granulométricos río La Victoria.....	36
<b>Tabla 3.6</b> Composición y clasificación río La Victoria .....	37
<b>Tabla 3.7</b> Granulometría río Tolomosa .....	38
<b>Tabla 3.8</b> Datos granulométricos río Tolomosa .....	38
<b>Tabla 3.9</b> Composición y clasificación río Tolomosa.....	39
<b>Tabla 3.10</b> Granulometría río Erquis.....	40
<b>Tabla 3.11</b> Datos granulométricos río Erquis.....	41
<b>Tabla 3.12</b> Composición y clasificación río Erquis .....	42
<b>Tabla 3.13</b> Peso específico y relación de vacíos río La Victoria .....	46
<b>Tabla 3.14</b> Peso específico y relación de vacíos río Tolomosa.....	47
<b>Tabla 3.15</b> Peso específico y relación de vacíos río Erquis .....	47

<b>Tabla 3.16</b> K obtenidos en laboratorio río La Victoria .....	49
<b>Tabla 3.17</b> K obtenidos en laboratorio río Tolomosa .....	50
<b>Tabla 3.18</b> K obtenidos en laboratorio río Erquis .....	50
<b>Tabla 4.1</b> Valores de K (Allen Hazen) suelos SW .....	52
<b>Tabla 4.2</b> Grado de relación entre variables suelos SW .....	54
<b>Tabla 4.3</b> Valores de K (Schlichter) suelos SW .....	55
<b>Tabla 4.4</b> Grado de relación entre variables suelos SW .....	58
<b>Tabla 4.5</b> Valores de K (Terzaghi) suelos SW .....	59
<b>Tabla 4.6</b> Grado de relación entre variables suelos SW .....	61
<b>Tabla 4.7</b> Porcentajes de variación de K de suelos SW .....	62
<b>Tabla 4.8</b> Porcentaje de variación promedio de suelos SW .....	62
<b>Tabla 4.9</b> Valores de K (Allen Hazen) suelos SP .....	64
<b>Tabla 4.10</b> Grado de relación entre variables suelos SP .....	66
<b>Tabla 4.11</b> Valores de K (Schlichter) suelos SP .....	67
<b>Tabla 4.12</b> Grado de relación entre variables suelos SP .....	70
<b>Tabla 4.13</b> Valores de K (Terzaghi) suelos SP .....	71
<b>Tabla 4.14</b> Grado de relación entre variables suelos SP .....	73
<b>Tabla 4.15</b> Porcentajes de variación de K de suelos SP .....	74
<b>Tabla 4.16</b> Porcentaje de variación promedio de suelos SP .....	75
<b>Tabla 4.17</b> Valores de K (Allen Hazen) suelos GW .....	78
<b>Tabla 4.18</b> Grado de relación entre variables suelos GW .....	80
<b>Tabla 4.19</b> Valores de K (Schlichter) suelos GW .....	81
<b>Tabla 4.20</b> Grado de relación entre variables suelos GW .....	84
<b>Tabla 4.21</b> Valores de K (Allen Hazen) suelos GW .....	85

<b>Tabla 4.22</b>	Grado de relación entre variables suelos GW .....	87
<b>Tabla 4.23</b>	Porcentajes de variación de K de suelos GW.....	88
<b>Tabla 4.24</b>	Porcentaje de variación promedio de suelos GW .....	88
<b>Tabla 4.25</b>	Valores de K (Allen Hazen) suelos GP.....	90
<b>Tabla 4.26</b>	Grado de relación entre variables suelos GP.....	92
<b>Tabla 4.27</b>	Valores de K (Schlichter) suelos GP.....	93
<b>Tabla 4.28</b>	Grado de relación entre variables suelos GP.....	96
<b>Tabla 4.29</b>	Valores de K (Terzaghi) suelos GP.....	97
<b>Tabla 4.30</b>	Grado de relación entre variables suelos GP.....	99
<b>Tabla 4.31</b>	Porcentajes de variación de K de suelos GP .....	100
<b>Tabla 4.32</b>	Porcentaje de variación promedio de suelos GP .....	100
<b>Tabla 4.33</b>	Porcentajes de variación promedio según el tipo de suelo.....	102
<b>Tabla 4.34</b>	Constantes para suelos SW .....	104
<b>Tabla 4.35</b>	Constantes para suelos GP .....	104
<b>Tabla 4.36</b>	Constantes para suelos SP.....	105
<b>Tabla 4.37</b>	Constantes para suelos GW.....	105
<b>Tabla 4.38</b>	Relación de variables según el coeficiente de correlación.....	106
<b>Tabla 4.39</b>	Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo SW .....	107
<b>Tabla 4.40</b>	Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo SW .....	109
<b>Tabla 4.41</b>	Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo SW .....	111
<b>Tabla 4.42</b>	Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo SP .....	113
<b>Tabla 4.43</b>	Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo SP .....	115
<b>Tabla 4.44</b>	Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo SP .....	117
<b>Tabla 4.45</b>	Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo GW .....	119

<b>Tabla 4.46</b>	Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo GW .....	121
<b>Tabla 4.47</b>	Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo GW .....	123
<b>Tabla 4.48</b>	Correlaciones de la constantes de Allen Hazen para suelo GP .....	125
<b>Tabla 4.49</b>	Correlaciones de la constantes de Schlichter para suelo GP.....	127
<b>Tabla 4.50</b>	Correlaciones de la constantes de Terzaghi para suelo GP.....	129
<b>Tabla 4.51</b>	Ecuaciones obtenidas de las correlaciones.....	131
<b>Tabla 4.52</b>	Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos SW.....	132
<b>Tabla 4.53</b>	Porcentaje de variación promedio de suelos SW .....	132
<b>Tabla 4.54</b>	Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos SP .....	134
<b>Tabla 4.55</b>	Porcentaje de variación promedio de suelos SP.....	135
<b>Tabla 4.56</b>	Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos GW .....	138
<b>Tabla 4.57</b>	Porcentaje de variación promedio de suelos GW .....	138
<b>Tabla 4.58</b>	Porcentaje de variación de K(ajustado) en suelos GP.....	140
<b>Tabla 4.59</b>	Porcentaje de variación promedio de suelos GP .....	140
<b>Tabla 4.60</b>	Porcentajes de variación promedio con el ajuste de ecuaciones .....	142
<b>Tabla 4.61</b>	Correlaciones de K para suelos SW .....	143
<b>Tabla 4.62</b>	Correlaciones de K para suelos SP .....	145
<b>Tabla 4.63</b>	Correlaciones de K para suelos GW .....	147
<b>Tabla 4.64</b>	Correlaciones de K para suelos GP.....	149
<b>Tabla 4.65</b>	Ecuaciones obtenidas para K según el tipo de suelo.....	151
<b>Tabla 4.66</b>	Pruebas de hipótesis en suelo SW .....	152
<b>Tabla 4.67</b>	Pruebas de hipótesis en suelo SP .....	153
<b>Tabla 4.68</b>	Pruebas de hipótesis en suelo GW .....	154
<b>Tabla 4.69</b>	Pruebas de hipótesis en suelo GP.....	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 2.1</b> Suelo granular.....	8
<b>Figura 2.2</b> Curva granulométrica .....	10
<b>Figura 2.3</b> Esquema de una muestra de suelo .....	14
<b>Figura 2.4</b> Esquema de una muestra de suelo .....	14
<b>Figura 2.5</b> Porosidad .....	16
<b>Figura 2.6</b> Estratigrafía de un suelo .....	19
<b>Figura 2.7</b> Permeámetro de carga constante .....	25
<b>Figura 2.8</b> Relación de la porosidad (n) vs c.....	28
<b>Figura 3.1</b> Mapa Hidrográfico de Tarija .....	30
<b>Figura 3.2</b> Puntos de extracción de muestras del río La Victoria .....	31
<b>Figura 3.3</b> Puntos de extracción de muestras del río Tolomosa.....	32
<b>Figura 3.4</b> Puntos de extracción de muestras del río Erquis .....	33
<b>Figura 3.5</b> Esquema de la práctica de granulometría.....	35
<b>Figura 3.6.</b> Curvas granulométricas río La Victoria .....	36
<b>Figura 3.7</b> Curvas granulométricas río Tolomosa.....	40
<b>Figura 3.8</b> Curvas granulométricas río Erquis .....	41
<b>Figura 3.9</b> Ensayo contenido de humedad .....	43
<b>Figura 3.10</b> Calibración de frasco N°1 .....	44
<b>Figura 3.11</b> Calibración de frasco N°2.....	44
<b>Figura 3.12</b> Ensayo peso específico agregado fino.....	45
<b>Figura 3.13</b> Ensayo peso específico agregado grueso.....	46
<b>Figura 3.14</b> Materiales para el ensayo de permeabilidad.....	48

<b>Figura 3.15</b> Ensayo de permeabilidad.....	49
<b>Figura 4.1</b> K Allen Hazen vs D10 suelos SW .....	53
<b>Figura 4.2</b> K Laboratorio vs D10 suelos SW .....	53
<b>Figura 4.3</b> K Laboratorio vs K Allen Hazen suelos SW .....	54
<b>Figura 4.4</b> K Schlichter vs D10 suelos SW .....	56
<b>Figura 4.5</b> K Schlichter vs n suelos SW.....	56
<b>Figura 4.6</b> K Laboratorio vs n suelos SW .....	57
<b>Figura 4.7</b> K Laboratorio vs K Schlichter suelos SW .....	57
<b>Figura 4.8</b> K Terzaghi vs D10 suelos SW .....	60
<b>Figura 4.9</b> K Terzaghi vs n suelos SW.....	60
<b>Figura 4.10</b> K Laboratorio vs K Terzaghi suelos SW .....	61
<b>Figura 4.11</b> Tabla de comparaciones de K en suelos SW .....	63
<b>Figura 4.12</b> K Allen Hazen vs D10 suelos SP .....	65
<b>Figura 4.13</b> K Laboratorio vs D10 suelos SP.....	65
<b>Figura 4.14</b> K Laboratorio vs K Allen Hazen suelos SP .....	66
<b>Figura 4.15</b> K Schlichter vs D10 suelos SP .....	68
<b>Figura 4.16</b> K Schlichter vs n suelos SP .....	68
<b>Figura 4.17</b> K Laboratorio vs n suelos SP .....	69
<b>Figura 4.18</b> K Laboratorio vs K Schlichter suelos SP .....	69
<b>Figura 4.19</b> K Terzaghi vs D10 suelos SP .....	72
<b>Figura 4.20</b> K Terzaghi vs n suelos SP .....	72
<b>Figura 4.21</b> K Laboratorio vs K Terzaghi suelos SP .....	73
<b>Figura 4.22</b> Tabla de comparaciones de K en suelos SP .....	75
<b>Figura 4.23</b> K Allen Hazen vs D10 suelos GW .....	79

<b>Figura 4.24</b> K Laboratorio vs D10 suelos GW .....	79
<b>Figura 4.25</b> K Laboratorio vs K Terzaghi suelos GW .....	80
<b>Figura 4.26</b> K Schlichter vs D10 suelos GW .....	82
<b>Figura 4.27</b> K Schlichter vs n suelos GW .....	82
<b>Figura 4.28</b> K Laboratorio vs n suelos GW .....	83
<b>Figura 4.29</b> K Laboratorio vs K Schlichter suelos GW .....	83
<b>Figura 4.30</b> K Terzaghi vs D10 suelos GW .....	86
<b>Figura 4.31</b> K Terzaghi vs n suelos GW .....	86
<b>Figura 4.32</b> K Laboratorio vs K Terzaghi suelos GW .....	87
<b>Figura 4.33</b> Tabla de comparaciones de K en suelos GW .....	89
<b>Figura 4.34</b> K Allen Hazen vs D10 suelos GP.....	91
<b>Figura 4.35</b> K Laboratorio vs D10 suelos GP .....	91
<b>Figura 4.36</b> K Laboratorio vs K Allen Hazen suelos GP.....	92
<b>Figura 4.37</b> K Schlichter vs D10 suelos GP.....	94
<b>Figura 4.38</b> Schlichter vs n suelos GP .....	94
<b>Figura 4.39</b> K Laboratorio vs n suelos GP .....	95
<b>Figura 4.40</b> K Laboratorio vs K Schlichter suelos GP.....	95
<b>Figura 4.41</b> K Terzaghi vs D10 suelos GP.....	98
<b>Figura 4.42</b> K Terzaghi vs n suelos GP .....	98
<b>Figura 4.43</b> K Laboratorio vs K Terzaghi suelos GP.....	99
<b>Figura 4.44</b> Tabla de comparaciones de K en suelos GP.....	101
<b>Figura 4.45</b> Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs %pasa N°10 .....	108
<b>Figura 4.46</b> Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs %pasa N°10 .....	110
<b>Figura 4.47</b> Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs D30 .....	112

<b>Figura 4.48</b>	Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs D30 .....	114
<b>Figura 4.49</b>	Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs D30 .....	116
<b>Figura 4.50</b>	Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs D10 .....	118
<b>Figura 4.51</b>	Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs %pasa N°200 .....	120
<b>Figura 4.52</b>	Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs %pasa N°200 .....	122
<b>Figura 4.53</b>	Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs e .....	124
<b>Figura 4.54</b>	Modelo ajustado para la constante de Allen Hazen vs D10 .....	126
<b>Figura 4.55</b>	Modelo ajustado para la constante de Schlichter vs D10 .....	128
<b>Figura 4.56</b>	Modelo ajustado para la constante de Terzaghi vs D10 .....	130
<b>Figura 4.57</b>	Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos SP .....	133
<b>Figura 4.58</b>	Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos SP .....	135
<b>Figura 4.59</b>	Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos GW .....	139
<b>Figura 4.60</b>	Tabla de comparaciones de K(ajustado) en suelos GP.....	141
<b>Figura 4.61</b>	Modelo ajustado de K vs Cu .....	144
<b>Figura 4.62</b>	Modelo ajustado de K vs D10 .....	146
<b>Figura 4.63</b>	Modelo ajustado de K vs D10 .....	148
<b>Figura 4.64</b>	Modelo ajustado de K vs % que pasa el tamiz N°200 .....	150