



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos de ladera**

**Guillermo Heriberto Hamón Barrero**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil  
Medellín, Colombia

2021



# **Evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos de ladera**

**Guillermo Heriberto Hamón Barrero**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Geotécnica**

Director (a):

PhD Hernán Eduardo Martínez Carvajal

Línea de Investigación:

Riego Geotécnico

Grupo de Investigación:

Grupo de Geotecnia

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2021



*Cada día es una nueva oportunidad para seguir tu camino, un paso a la vez.*

*Trabajo y Rectitud.*

*Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.*



## Declaración de obra original

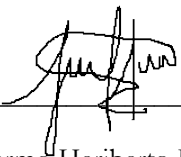
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Guillermo Heriberto Hamón Barrero

28/Septiembre/2021

Fecha

## **Agradecimientos**

A mis padres

Por su constante e inagotable apoyo a lo largo de mi formación como persona y como profesional.

Al Profesor Herman Martínez

Por la dedicación y disposición para mi proceso formativo como profesional y magister.

A Natalia Cubillos.

Por compartir su tiempo junto a mí a través del transcurso de mi vida. Enseñándome a ver el mundo desde otra perspectiva, para valorar y demostrar mi amor a los seres que quiero.

A la Universidad Nacional de Colombia.

Porque a pesar de las dificultades presupuestales debido a la deficiente administración por parte del Gobierno Nacional en las últimas décadas, ha otorgado los mejores profesores a sus estudiantes, para que el proceso de enseñanza, exigencia y calidad de profesionales egresados generen impacto nacional e internacionalmente.



## Resumen

### **Evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos de tierra**

La vulnerabilidad física de estructuras es definida como el grado de daño o pérdida de un elemento. Es un valor adimensional con un rango de 0 a 1. Además, es un elemento clave para la evaluación del riesgo a deslizamientos de ladera, siendo este esencial para la predicción de las consecuencias de un deslizamiento de tierra.

El presente trabajo, muestra el diseño, construcción y calibración de un modelo a escala de laboratorio que posee la capacidad de reconstruir parámetros geométricos de la ladera y la resistencia de la estructura para la estimación de la vulnerabilidad de estructuras individuales expuestas a deslizamientos. El modelo tiene en cuenta parámetros de intensidad del deslizamientos por medio del gradiente modificado  $Z$  propuesto por Guimaraes-Silva (2015) y la resistencia de las estructuras calculada por medio de la metodología de Li *et al.* (2010) la cual fue parametrizada por medio del modelo T. El dimensionamiento del modelo se hizo a partir del banco de datos de los deslizamientos en Nova Friburgo, Brasil, en Enero del 2011 y los deslizamientos ocurridos en Corea del sur entre Julio y Agosto del 2011.

Se evaluó la relación entre la vulnerabilidad física y el impacto de deslizamientos de masa a partir de la interpretación de los experimentos en el modelo físico para la obtención de curvas equivalentes de vulnerabilidad. Obteniendo que cuanto mayor es el gradiente modificado, mayor es la vulnerabilidad y que a medida que el centro de gravedad de la estructura se encuentre mas alejada del deslizamiento, menor es su vulnerabilidad.

**Palabras clave:** modelo a escala de laboratorio, vulnerabilidad física, material deslizante, resistencia, calibración, geometría de la ladera y deslizamiento.

## Abstract

### **Physical vulnerability assessment of structures impacted by landslides**

The physical vulnerability of structures is defined as the level of damage or loss of an element. It is a dimensionless value with a range from 0 to 1. Moreover, it is a key element for the evaluation of landslide risk, and it is essential for the prediction of the consequences of a landslide.

This work shows the design, construction and calibration of a laboratory-scale model that can reconstruct geometric parameters of the slope for the estimation of the vulnerability of individual structures exposed to landslides. The model considers landslide intensity parameters using the modified Z gradient proposed by Guimaraes-Silva (2015) and the resistance of the structures calculated employing the methodology of Li et al. (2010) which was parameterized through the T model. The scaling of the model was made from the data bank of the landslides in Nova Friburgo, Brasil, in January 2011 and the landslides occurred in South Korea between July and August 2011.

The relationship between physical vulnerability and the impact of landslides is evaluated from the interpretation of the experiments in the physical model to obtain vulnerability curves. The results show that the higher the modified gradient, the higher the vulnerability. Besides, the farther the centre of gravity of the structure is from the landslide, the lower the vulnerability.

**Keywords: laboratory scale model, physical vulnerability, sliding material, strength, calibration, slope geometry and landslide.**

# Contenido

|  | Pág.        |
|--|-------------|
| <b>Resumen.....</b>  | <b>IX</b>   |
| <b>Lista de Figuras.....</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>Lista de Tablas .....</b>   | <b>XIV</b>  |
| <b>Lista de Ilustraciones .....</b>  | <b>XV</b>   |
| <b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>   | <b>XVI</b>  |
| <b>Introducción .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>1 Objetivos.....</b>  | <b>5</b>    |
| 1.1 Objetivo general.....  | 5           |
| 1.2 Objetivos específicos.....   | 5           |
| <b>2 Revisión de la literatura.....</b>  | <b>6</b>    |
| 2.1 Movimientos de masa.....   | 6           |
| 2.1.1 Tipos de movimientos de masa.....  | 7           |
| 2.1.2 Factores que favorecen el movimiento en masa.....  | 9           |
| 2.2 Evaluación del riesgo por movimientos de masa.....   | 10          |
| 2.2.1 Susceptibilidad a deslizamientos de tierra.....  | 12          |
| 2.2.2 Amenaza.....   | 13          |
| 2.2.3 Vulnerabilidad.....  | 13          |
| 2.2.4 Riesgo.....  | 18          |
| 2.3 Evaluación de la vulnerabilidad.....   | 22          |
| 2.3.1 Modelo T para la evaluación de la vulnerabilidad.....  | 31          |
| <b>3 Metodología.....</b>  | <b>33</b>   |
| 3.1 Diseño del modelo experimental a escala de laboratorio.....  | 33          |
| 3.1.1 Variables para el diseño del modelo experimental a escala de laboratorio.....  | 33          |
| 3.1.2 Material de la masa deslizante.....  | 35          |
| 3.1.3 Diseño, materiales y construcción del modelo físico.....   | 41          |
| <b>3.1.3.1</b> Diseño.....   | 41          |
| <b>3.1.3.2</b> Materiales y construcción.....  | 46          |
| 3.2 Diseño de ensayos.....   | 53          |
| 3.3 Resultado de ensayos realizados en el modelo a escala de laboratorio.....  | 59          |
| 3.4 Descripción de la calibración de la ecuación de ajuste para el modelo a escala y sistema de normalización de los datos de laboratorio..... | 63          |
| <b>4 Calibración del modelo a escala de laboratorio.....</b>   | <b>65</b>   |
| 4.1 Base teórica.....  | 65          |
| 4.2 Calibración de la variable característica $T^*$ y parámetro no dimensional de proporcionalidad $\delta$ .....                              | 70          |
| 4.2.1 Calibración de la variable característica $T^*$ .....  | 70          |
| 4.2.2 Calibración del parámetro no adimensional de proporcionalidad $\delta$ .....   | 81          |
| 4.2.3 Calibración global para $T^*$ y delta.....   | 84          |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>5</b>  | <b>Análisis de resultados</b> .....  | <b>87</b>  |
| 5.1       | Parametrización de la resistencia de a estructuras para la simulación en el modelo a escala.   | 87         |
| 5.2       | Relación entre la vulnerabilidad física de la estructura y la geometría del talud. ....  | 92         |
| <b>6</b>  | <b>Conclusiones</b> .....  | <b>97</b>  |
| 6.1       | Aplicaciones del prototipo a escala y sugerencias para futuras investigaciones. ....   | 99         |
| <b>A.</b> | <b>Anexo: Plano sección de impacto.</b> .....  | <b>101</b> |
| <b>B.</b> | <b>Anexo: Plano elemento que realiza la conexión entre la rampa y la sección de impacto.</b>   | <b>103</b> |
| <b>C.</b> | <b>Anexo: Plano rampa del modelo.</b> .....  | <b>105</b> |
| <b>D.</b> | <b>Anexo: Plano Ensamble número 1.</b> .....   | <b>107</b> |
| <b>E.</b> | <b>Anexo: Plano caja de impacto.</b> .....   | <b>109</b> |
| <b>F.</b> | <b>Anexo: Plano tapa de impacto.</b> .....   | <b>111</b> |
| <b>G.</b> | <b>Anexo: Ensamble número 3.</b> .....   | <b>113</b> |
| <b>H.</b> | <b>Anexo: Ensamble número 4.</b> .....   | <b>115</b> |
| <b>I.</b> | <b>Anexo: Plano mecanismo de la compuerta de liberación del material.</b> .....  | <b>117</b> |
| <b>J.</b> | <b>Anexo: Plano compuerta de liberación de material</b> .....  | <b>119</b> |
| <b>K.</b> | <b>Anexo: Ensamble número 5</b> .....  | <b>121</b> |
| <b>L.</b> | <b>Anexo: Banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Nova Friburgo, Brasil, en Enero del 2011 tomado de Guimaraes Silva (2015)</b> .....  | <b>123</b> |
| <b>M.</b> | <b>Anexo: Banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Corea del Sur entre Julio y Agosto del 2011. Tomado de (Kang and Kim 2016)</b> ..... | <b>124</b> |
|           | <b>Bibliografía</b> .....  | <b>125</b> |

## Lista de Figuras

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura 2.2.4-1:</b> Determinación del riesgo a partir de (Bizottság 2010; ISDR 2009) ..... | 19          |
| <b>Figura 3.1.1-1</b> .....   | 34          |

## Lista de Tablas

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Tabla 1.1-1:</b> Deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburra. (Ariztizábal & Yokota 2006). .....   | 2    |
| <b>Tabla 2.2.3-1:</b> Evolución del concepto de vulnerabilidad a través de diferentes autores. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015); Evolución del concepto de vulnerabilidad a través de diferentes autores. Tomado de: Guimares-Silva (2015) (Modificado) .....                   | 14   |
| <b>Tabla 2.2.3-2:</b> Concepto de vulnerabilidad a partir de otras disciplinidades. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015) citando a Pichardo (2004).: Concepto de vulnerabilidad a partir de otras disciplinidades. Tomado de: Guimares-Silva (2015) citando a Pichardo (2004) ..... | 17   |
| <b>Tabla 3.1.2-1:</b> Tipos de movimientos de masa de acuerdo con el material transportado. Tomado de Varnes (1978) modificada por Cruden & Varnes (1996) .....  | 34   |
| <b>Tabla 3.1.2-2:</b> Resultado del análisis granulométrico del material deslizante en el prototipo a escala.<br>35  |      |
| <b>Tabla 3.1.2-3:</b> Resultados del ensayo de humedad de la muestra. ....   | 40   |
| <b>Tabla 3.1.2-4:</b> Gravedad específica del material. ....   | 40   |
| <b>Tabla 3.2-1:</b> Relaciones utilizadas para la obtención de diferentes gradientes modificados. ....   | 54   |
| <b>Tabla 3.2-2:</b> Combinaciones utilizadas para la obtención de diferentes gradientes modificados ....   | 56   |
| <b>Tabla 3.3-1:</b> Resultados obtenidos en los ensayos realizados. ....   | 63   |
| <b>Tabla 4.2.1-1:</b> Datos obtenidos en el ensayo para gradiente modificado $Z=0,5$ . ....  | 71   |
| <b>Tabla 4.2.1-2:</b> Valores de calibración del modelo experimental para $z=0,5$ . ....   | 74   |
| <b>Tabla 4.2.1-3:</b> Valores de vulnerabilidad estimados de la ecuación de calibración para el modelo experimental en $Z=0,5$ . ....  | 75   |
| <b>Tabla 4.2.1-4:</b> Valores parametrizados de $V_x$ y el valor obtenido de $Z/R=T$ para cada uno de los ensayos. ....  | 76   |

## Lista de Ilustraciones

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Ilustración 3.1.3.1-2:</b> Diseño a escala del modelo de laboratorio .....   | 41          |
| <b>Ilustración 3.1.3.1.3-:</b> Sección de impacto .....   | 42          |
| <b>Ilustración 3.1.3.1-:</b> Elemento que realiza la conexión entre la rampa y la sección de impacto .....  | 42          |
| <b>Ilustración 3.1.3.2-2:</b> Tapa de impacto .....   | 49          |
| <b>Ilustración 2.1.1.2-3:</b> Rampa de deslizamiento del material .....   | 49          |
| <b>Ilustración 2.1.1.2-5:</b> Conexión entre sección de impacto y rampa .....   | 51          |
| <b>Ilustración 2.1.1.2-6:</b> Compuerta de deslizamiento.....   | 52          |
| <b>Ilustración 2.1.1.2-7:</b> Modelo experimental ensamblado52;Error! No se encuentra el origen de la referencia.: Variables en el modelo a es de laboratorio para la ejecución de ensayos..... | 58          |
| <b>Ilustración 3.2-2:</b> Medición de la masa deslizante. : Medición de la masa deslizante.....   | 58          |
| <b>Ilustración 3.1.3.2-3:</b> Tabulación de la combinación correspondiente del ensayo que se va a realizar: Tabulación de la combinación correspondiente del ensayo que se va a realizar.....   | 58          |
| <b>Ilustración 3.1.3:</b> Medición y tabulación del movimiento que generó el deslizamiento en la estructura   | 58          |
| <b>Ilustración 3.1.3.2-5:</b> Medición de la traza que dejó el deslizamiento en la estructura .....   | 58          |
| <b>Ilustración</b> .....  | 59          |
| <b>Ilustración 5.11:</b> Esquematación del procedimiento para obtener el valor de R en el modelo a escala   | 88          |

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

| Símbolo            | Término  | Unidad SI | Definición |
|--------------------|--|-----------|------------|
| $a$                | Parámetro de proporcionalidad  | 1         | Eq. 4.1-1  |
| $D$                | Distancia entre centro de gravedad y punto de inicio de la masa      | cm        |            |
| $G_s$              | Gravedad específica  | 1         |            |
| $G_{s\text{prom}}$ | Gravedad específica promedio   | 1         |            |
| $H$                | Abscisa en donde inicia el deslizamiento                             | cm        |            |
| $L$                | Distancia real recorrida   | cm        |            |
| $M_{pw}$           | Masa del picnómetro  | gr        |            |
| $M_{pns}$          | Masa del picnómetro  | gr        |            |
| $R$                | Resistencia del elemento impactado                                   | kg        |            |
| $R_{str}$          | Resistencia de las estructuras                                       | kg        | Eq. 5.1-1  |
| $T$                | Relación entre gradiente modificado y resistencia                    | 1         | Z/R        |
| $V$                | Vulnerabilidad   | 1         | Eq. 4.1    |
| $V_x$              | Desplazamiento de la estructura impactada                            | cm        |            |
| $W_{ret}$          | Peso retenido  | gr        |            |
| $W_s$              | Masa de los sólidos  | gr        |            |
| $X$                | Valor desplazado   | cm        |            |
| $X_i$              | Distancia entre centro de gravedad y la cota menor del deslizamiento | cm        |            |
| $X_{totalProm}$    | Promedio del desplazamiento  | cm        |            |
| $Z$                | Gradiente modificado   | 1         |            |

### Símbolos con letras griegas

| Símbolo     | Término  | Unidad SI | Definición |
|-------------|--|-----------|------------|
| $\alpha$    | Factor de corrección de temperatura                                      | 1         |            |
| $\delta$    | Parámetro de proporcionalidad  | 1         | Eq. 4.1-4  |
| $\xi_{sfd}$ | Factor de resistencia de la edificación                                  | 1         |            |
| $\xi_{sty}$ | Factor de resistencia para la tipología de la estructura                 | 1         |            |
| $\xi_{smn}$ | Factor de resistencia según el estado de mantenimiento de la estructura. | 1         |            |
| $\xi_{sht}$ | Factor de resistencia por número de pisos                                | 1         |            |

### Subíndices



**Subíndice      Término**


---

T                      Tiempo
**Superíndices****Superíndice      Término**


---

\*                      Característico
**Abreviaturas**

| <b>Abreviatura</b> | <b>Término</b>   |
|--------------------|--|
| <i>2.LN</i>        | Segunda ley de Newton  |
| <i>AGS</i>         | Austrian Geophysical Society   |
| <i>ASTM</i>        | American Society for Testing and Materials                               |
| <i>CEPAL</i>       | Comisión Económica para América Latina y el Caribe                       |
| <i>CI</i>          | Caja de Impacto  |
| <i>DNP</i>         | Departamento Nacional de Planeación                                      |
| <i>GEO</i>         | GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE  |
| <i>IAEG</i>        | International Association of Engineering Geology and the Environment     |
| <i>ISDR</i>        | International Strategy for Disaster Reduction                            |
| <i>ISRM</i>        | International Society for Rock Mechanics                                 |
| <i>ISSMGE</i>      | International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering    |
| <i>IUGS – WGL</i>  | International Union of Geological Sciences - Working Group on Landslides |
| <i>JTC1</i>        | Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 1          |
| <i>MDF</i>         | Medium-density fibreboard  |
| <i>OFAT</i>        | Office fédéral de l'aménagement du territoire                            |
| <i>OFEE</i>        | Office fédéral de l'économie des eaux                                    |
| <i>OFEPF</i>       | Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage              |
| <i>QRA</i>         | Quantitative risk analysis   |
| <i>SIG</i>         | Sistema de Información geográfica  |
| <i>SP</i>          | Arena mal gradada  |
| <i>Ss</i>          | Suelo seco   |
| <i>TI</i>          | Tapa de Impacto  |
| <i>UNGRD</i>       | Unidad Nacional para la gestión del Riesgo de Desastres                  |
| <i>USGS</i>        | United States Geological Survey  |



## Introducción

Los eventos de movimiento de masa o deslizamientos de ladera son detonados por la combinación de diferentes elementos naturales o acciones antrópicas (Einstein 1988; Hutchinson 1995). La precipitación, sismos, condiciones geomorfológicas, cambios en el nivel freático, grado de intemperismo, grado de erosión y parámetros que generan un proceso denudativo de la ladera que están ligados a las condiciones del entorno para la ocurrencia de estos (Tominaga, Santoro, & Amaral 2009). El crecimiento poblacional y el desarrollo humano producen el establecimiento de comunidades en zonas susceptibles a deslizamientos de ladera (Nadim & Kjekstad 2009; Schuster 1996), esta expansión urbana se extiende sobre laderas o zonas montañosas propensas a encontrarse en riesgo de deslizamiento (Hu, Cui, & Zhang 2012)

Los (MartínezCarvajal et al. 2018) planes de ordenamiento territorial en países en vía de desarrollo se están enfocando en la mitigación del riesgo de este fenómeno para lograr una administración pública y protección de vidas humanas (Alexander 1984; Cardona 1993; Zanchetta et al. 2004). Durante las últimas décadas se han reportado un sin número de desastres debido a deslizamientos con una tendencia espacial a los países localizados en el Anillo del Pacífico, las pérdidas en vidas humanas y económicas superan los reportes de países desarrollados (Alcántara-Ayala 2002; Ernst 2001).

Colombia, siendo uno de los países que se encuentra localizado en el Anillo del Pacífico, sufre de altas precipitaciones debido a su localización geográfica (CEPAL 2013), siendo este un factor detonante de deslizamiento de laderas; Ha sufrido pérdidas humanas y económicas debidas a estos eventos naturales. El Departamento Nacional de Planeación del país, sitúa en primer lugar al departamento Antioquia en afectaciones por desastres naturales, teniendo 888 eventos en el periodo concebido entre 2006 a 2014 reportados ante la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (**UNGRD**), donde 283 de estos eventos corresponden a deslizamientos (DNP 2015). Al igual que el periodo comprendido entre 1920 y 1990, teniendo el 48% de los desastres ocurridos, de los 769 desastres reportados (Polanco & Bedoya 1979). El Valle de Aburrá ha tenido diferentes catástrofes de esta índole, que han producido grandes pérdidas económicas y de vidas humanas. En la Tabla 1.1-1: Deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburra. (Ariztizábal & Yokota 2006). se tabulan los mayores deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburra de acuerdo con **Tabla 1.1-1: Deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburra.** (Ariztizábal

& Yokota 2006). Ariztizábal & Yokota (2006) y los clasifican de acuerdo a la descripción de diferentes fuentes siguiendo la clasificación de (Cruden & Varnes 1996).

**Tabla 1.1-1:** Deslizamientos ocurridos en el Valle de Aburra. (Ariztizábal & Yokota 2006).

| Movimiento en masa                       | Año                   | Localización                | Daños   |           |
|--|-----------------------|-----------------------------|---------|-----------|
|  |                       |                             | Muertos | Afectados |
| Flujo de escombros                       | 23 de Abril<br>1880   | La Iguaná<br>(Medellín)     | 9       | 2500      |
| Flujo de lodos                           | 18 de Jun.<br>1927    | Rosellón (Envigado)         | 18      | 25        |
| Flujo de lodos                           | 12 de Jul.<br>1954    | Media Luna (Santa Elena)    | >100    | 67        |
| Deslizamiento de escombros               | de 25 de Jun.<br>1973 | La Manguala (S.A. Prado)    | 13      | 24        |
| Flujo de lodos                           | 29 de Sept.<br>1974   | Santa Domingo<br>(Medellín) | >70     | 1500      |
| Flujo de escombros                       | 20 de Oct.<br>1980    | San Antonio<br>(Medellín)   | >18     | 250       |
| Deslizamiento de escombros               | de 23 de Nov.<br>1984 | Santa Maria (Itagui)        | 10      | 200       |
| Deslizamiento de lodo                    | 26 de Sep.<br>1985    | Popular 2 (Medellín)        | 6       | 60        |
| Deslizamiento - flujo de lodos compuesto | 27 de Sept.<br>1987   | Villatina (Medellín)        | >500    | 3000      |

Este incremento en pérdidas económicas y en vidas humanas debido a los deslizamientos de laderas han generado un auge en la investigación acerca del riesgo (Nadim and Kjekstad 2009; Papathoma-Koehle et al. 2012; Papathoma-Köhle et al. 2015; Schuster 1996). Para una adecuada evaluación del riesgo se hace necesario una evaluación de la vulnerabilidad para los elementos que se encuentran expuestos a deslizamientos (Uzielli et al. 2008). Los elementos en riesgo incluyen edificaciones, carreteras, ferrocarriles, minas, presas; la presencia de edificaciones expuestas a estos eventos en las áreas urbanas y periurbanas en comparación con otros elementos son más comunes (Hu, Cui, & Zhang 2012).

La Sociedad de Mecánica de Suelo e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) define la vulnerabilidad en su glosario de evaluación de riesgo como el grado de pérdida de un elemento dentro de un área afectada por el riesgo de deslizamiento de tierra. Expresada en una escala de cero a uno, donde cero se interpreta como sin pérdidas mientras que uno es interpretado como pérdida total del elemento. La vulnerabilidad puede influir en las pérdidas en mayor grado que la misma amenaza (Alexander 1984; Einstein 1988). La evaluación de la vulnerabilidad necesita un entendimiento de la interacción entre el peligro y los elementos de riesgo. Esta interacción puede ser entendida con el uso de curvas de vulnerabilidad (Du et al. 2013; Quan Luna et al. 2011). Siendo la vulnerabilidad uno de los componentes más importantes para la estimación del riesgo (Einstein 1988; Leone, Asté, and Leroi 1996; Varnes 1984)

La evaluación de la vulnerabilidad se ha basado predominantemente en un análisis cualitativo (Du et al. 2013; Li et al. 2010; Uzielli et al. 2008) y subjetivo, basándose en gran medida en registros históricos de diferentes partes del mundo (Dai, Lee, and Ngai 2002). Así, por medio de un tratamiento de los datos cualitativo realizar un análisis cuantitativo para la construcción de curvas de la vulnerabilidad vs intensidad del evento (velocidad, características del material, presión de impacto, geometría de la ladera) y resistencia del elemento (edad de la edificación, profundidad de cimentación, mantenimiento, tipo de estructura) (Li et al. 2010). Por ejemplo, Finlay (1996) proporciona rangos y valores de vulnerabilidad de las personas en un espacio abierto, en un vehículo o en un edificio a partir de registros históricos de eventos de deslizamientos.

Uzielli *et al.* (2008) proponen un marco conceptual para la estimación cuantitativa de la vulnerabilidad física de edificaciones a deslizamientos de ladera enfocándose en un escenario específico; este estudio deriva de una parcialización del abordaje probabilístico para obtener una vulnerabilidad regional, evaluando la vulnerabilidad a partir de la intensidad del movimiento y de la susceptibilidad de los elementos en riesgo, personas y estructuras. Por otro lado Li *et al.* (2010) cuantifican la vulnerabilidad de las estructuras, comprendiendo la resistencia como el reflejo de la capacidad de los elementos vulnerables para resistir la acción del deslizamiento de tierra con cierto grado de severidad. El cual es representado por medio de un indicador para las estructuras que son amenazadas por un deslizamiento de tierra. Definiendo un modelo cuantitativamente como una función de la intensidad del deslizamiento de tierra y la resistencia de los elementos.

El desarrollo de análisis cuantitativos que logren evaluar la interacción entre un deslizamiento sobre una estructura, y que proporcionen información para la identificación de zonas en la que el deslizamiento afecte considerablemente a la población en riesgo, han sido limitados (Corominas et al. 2014). Por lo que no existe

una metodología definida que obtenga la vulnerabilidad para diferentes tipos de amenaza (Guimaraes-Silva 2015). Por lo tanto, esta investigación propone un modelo a escala hecho en laboratorio para obtener una relación entre los parámetros que intervienen en la interacción del movimiento de masa y la estructura en donde se reconstruya las condiciones In-Situ del lugar, logrando controlar las variables del movimiento y la resistencia de la estructura para la construcción de curvas de vulnerabilidad esenciales para la evaluación de riesgos, la priorización de políticas nacionales de gestión de desastres y la planificación futura de las ciudades. Adicionalmente, para relacionar los valores obtenidos en el laboratorio con parámetros de modelos matemáticos cuantitativos.

# **1 Objetivos.**

## **1.1 Objetivo general.**

Construcción de curvas equivalentes de vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos a partir de un prototipo de laboratorio.

## **1.2 Objetivos específicos.**

- Evaluar la relación entre la vulnerabilidad física y el impacto de deslizamientos de masa.
- Diseñar y construir el modelo físico.
- Diseño, ejecución e interpretación de los experimentos en el modelo físico.
- Relacionar los datos obtenidos en el laboratorio con la interacción entre la masa deslizante y la estructura.
- Construir y validar curvas de vulnerabilidad a partir de los datos experimentales por medio del modelo T propuesto por Guimaraes-Silva (2015)

## 2 Revisión de la literatura.

Este capítulo presenta todo el compendio del estado del arte acerca de la vulnerabilidad física y los factores más importantes que se evaluaron en este trabajo.

### 2.1 Movimientos de masa.

Los movimientos de masa son todos aquellos desplazamientos de una masa de roca, detritos o de tierra del terreno a favor de la pendiente del talud por efecto de la gravedad (Cruden 1991). Bajo esta definición existen diferentes tipos de movimientos de masa, algunos se caracterizan por ser movimientos rápidos gravitacionales a los cuales se les identifica límites claros, presentando una superficie de ruptura y su respectiva profundidad (Crozier & Glade 1999), mientras que otros movimientos de masa logran ser lentos, imperceptibles, pequeños, debido a que la velocidad de su movimiento es muy baja (Gemma 2007).

Los movimientos de masa son detonados por el debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas del material debido a la acción independiente o combinación de diferentes aspectos naturales intrínsecos del lugar o acciones antrópicas (Einstein 1988; Hutchinson 1995). Los aspectos naturales que afectan la estabilidad son: meteorización, levantamiento tectónico, precipitación o sismo. Siendo estas dos últimas las que estimulan una respuesta inmediata al movimiento de masa, ya sea por la rápida reducción de la resistencia o por el incremento en los esfuerzos (Wang and Sassa 2003); Por otro lado, las acciones antrópicas como el crecimiento poblacional y el desarrollo humano, producen el establecimiento de comunidades en zonas susceptibles a movimientos de masa (Nadim & Kjekstad 2009; Schuster 1996) y modificación del espacio para la construcción de obras civiles que generalmente activan movimientos lentos e imperceptibles (Van Westen, Van Asch, and Soeters 2006).



---

Aristizábal, Martínez, & Vélez (2010) categorizan los factores que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos en masa en dos: variables Cuasi-estáticas o condicionantes y las variables dinámicas o detonantes. Las variables Cuasi-estáticas se refieren a las propiedades del suelo, topografía, geomorfología. En tanto las variables dinámicas hacen referencia a grado de saturación, cohesión, climatología, procesos hidrológicos y las actividades humanas que caracterizan el patrón temporal de los movimientos en masa (Crosta and Frattini 2003).

En general, los deslizamientos se generan cuando la resistencia al corte del material disminuye en relación con su resistencia debido a diferentes factores. Esta reducción por lo general es gradual, generando una deformación progresiva en el material, hasta lograr una superficie de falla o ruptura por la que el material se moviliza (Crozier & Glade 1999). La velocidad aumenta y a medida que sucede el evento, disminuye hasta que la masa deslizante se estabiliza (Crosta and Frattini 2003; Guidicini and Nieble 1976).

### **2.1.1 Tipos de movimientos de masa.**

Diversas clasificaciones han sido propuestas para los movimientos de masa, basadas en el tipo de material, tipo de movimiento, velocidad, causas y otros factores.

La clasificación de Varnes (1978), actualizada por Cruden and Varnes (1996), introduciendo un marco taxonómico multidimensional junto con Hutchinson (1988) y Nogueira (2002), son las más aceptadas en el mundo. Las cuales emplean como criterio principal el tipo de movimiento y el tipo de material. Obteniendo así cinco tipos de movimientos en masa, siendo estos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones laterales y flujos. Además, teniendo una subdivisión de acuerdo con su velocidad y la cantidad de agua presente en el material. En tanto divide los materiales en rocas y suelo, subdividiendo el suelo en detritos y tierra. En la

**Tabla 2.1.1-1:** Clasificación de movimientos de masa (Varnes 1978) modificado por (Cruden and Varnes 1996). Tomado de (Gemma 2007). **2.1.1-1** se clasifican los movimientos de masas propuestos por Varnes (1978) con su respectiva actualización Cruden and Varnes (1996). La clasificación propuesta por Varnes (1978) es adoptada por la clasificación IAEG (International Association of Engineering Geology).

**Tabla 2.1.1-1:** Clasificación de movimientos de masa (Varnes 1978) modificado por (Cruden and Varnes 1996). Tomado de (Gemma 2007).

| Tipo de movimiento            | Subtipo  |
|-------------------------------|--|
| Caída                         | Caída de roca (detritos o suelo)   |
| Volcamiento de roca (bloque)  | Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso<br>Volcamiento de roca (bloque)   |
| Deslizamiento de roca o suelo | Deslizamiento traslacional<br>Deslizamiento en cuña<br>Deslizamiento rotacional  |
| Propagación lateral           | Propagación lateral lenta<br>Propagación lateral por licuación (rápida)  |
| Flujo                         | Flujo de detritos<br>Crecida de detritos<br>Flujo de lodo<br>Flujo de tierra<br>Flujo de turba<br>Avalancha de detritos<br>Avalancha de rocas<br>Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada) |
| Reptación                     | Reptación de suelos  |

---

 Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
 

---

 Deformaciones gravitacionales profundas
 

---

**2.1.2 Factores que favorecen el movimiento en masa.**

La inestabilidad de laderas conlleva la intervención y modificación de forma conjunta de varios factores (M J Crozier 1984; Doornkamp and Cooke 1974). Estos factores que influyen al desarrollo de movimiento de masa los divide Sharpe (1938) en dos tipos: permanentes (Constantes) y variables (Activos) (Sharpe 1938).

Los factores permanentes son de carácter pasivo, como las características del terreno, pendiente, tipo de material. De otro lado los factores activos, de los cuales se destacan la precipitación (intensa o acumulada), que implica el aumento del contenido de agua y la presión intersticial del suelo y la actividad sísmica, que produce aumento del esfuerzo de cizalla (Jiménez 2005). Estos controlan la actividad en tiempo debido a su variabilidad e intensidad, interfiriendo sobre los factores permanentes, modificándolos y desencadenando la inestabilidad en áreas con determinada susceptibilidad (Sharpe 1938). La **Tabla 2.1.2-1:** Factores que favorecen el movimiento en masa. presenta los diferentes factores constantes y variables que son considerados por Sharpe (1938).

**Tabla 2.1.2-1:** Factores que favorecen el movimiento en masa.

| Factores constantes                              | Factores Variables         |
|--|----------------------------|
| Naturaleza de los materiales.                    | Climatología.              |
| Relación estructura-ladera.                      | Meteorización.             |
| Pendiente topográfica y morfología de la ladera. | Agua.                      |
| Vegetación                                       | Erosión fluvial y costera. |
| Geología   | Sismicidad de la zona.     |
|  | Acciones antrópicas        |

---

Jiménez (2005) afirma que la combinación de los factores permanentes condiciona la estabilidad, determinan la relación entre las fuerzas resistentes y las desestabilizantes. Mientras que la combinación de los factores variables inicia el movimiento debido a la modificación, frecuentemente rápida, de las condiciones iniciales del área de estudio.

Diferentes autores se han enfocado en determinar que factor o factores son los más influyente en el desencadenamiento de la inestabilidad (Guidicini and Nieble 1976; Varnes 1984). Guidicini and Nieble (1984) denominan los factores propuestos por Sharpe (1938) como agentes predisponentes, dándole una gran relevancia a la acción antrópica, desarrollada por el hombre, siendo este un factor que intensifica el desencadenamiento de la inestabilidad o minimiza sus efectos debido a las diferentes modificaciones que hace en el ambiente. Mientras que Varnes( 1984) propone las causas básicas de la inestabilidad, dándole relevancia al tipo de material, composición, estructura, pendiente pronunciada de la ladera, variación en el nivel freático y vibraciones sísmicas. Por otro lado, Aristizábal, Martínez, & Vélez (2010) consideran como factor detonante la lluvia en la ocurrencia de movimientos de masa como uno de los más influyentes.

Para determinar e interpretar la probabilidad de ocurrencia de un movimiento de masa, se requiere comprender los mecanismos de deslizamiento, condiciones y procesos que controlan el movimiento en el área de estudio, para obtener el riesgo inminente, que permite la predicción del riesgo mediante la información local, puntual o regional.

## **2.2 Evaluación del riesgo por movimientos de masa.**

Westen & Greiving (2017) definen que los procesos geológicos y geotécnicos son causados por un proceso continuo endogenico, en el que se genera y se degrada corteza terrestre. Causante

---

de modificaciones en el ambiente durante un determinado tiempo. Esta continua orogenia se ve reflejada en eventos como terremotos y erupciones volcánicas. Por otro lado, la interacción de los procesos exógenos intervine de igual forma que los endogenicos. Entendido como interacción exogenica, a los procesos generados por la atmosfera de la tierra, la hidrosfera, la geosfera, la biosfera y la criosfera.

El ser humano también influye en las modificaciones del ambiente, tanto a una escala local como global. Estas actividades antropogénicas en una escala global han influido en las modificaciones de la tierra en los últimos 200 años (Westen & Greiving 2017) como lo es, el aumento de gases, produciendo efecto invernadero. Mientras que, en una escala local, estas modificaciones se ven reflejadas en, la transformación de la cobertura terrestre, la sobre explotación de recursos y el crecimiento poblacional.

Los desastres naturales como los deslizamientos de tierra son causados por procesos de naturaleza endogenica, exogenica, antropogénica o la combinación de estos. Estos eventos potencialmente dañinos son conocidos como amenaza. Su estudio permite entender las variables involucradas para hacer una evaluación del riesgo. Entendiendo la amenaza como una condición que causa un potencial daño, por ejemplo, la amenaza de un movimiento de masa se debe a su ubicación, volumen, clasificación, velocidad del posible desprendimiento y la probabilidad de que ocurra dentro de un periodo de tiempo (Corominas et al. 2014). Mientras que el riesgo se entiende como la probabilidad de que ocurra el evento con potencial de daño(Corominas et al. 2014).

Varnes (1984) propone definiciones claras para los significados de riesgo, amenaza y vulnerabilidad, para lograr una estandarización en la terminología, debido a la creciente necesidad de directrices para el desarrollo del análisis y gestión del riesgo. No obstante hasta el

2005, Fell et al. (2005) junto con ASG (Austrian Geophysical Society), ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering), AIEG (International Association for Engineering Geology and the Environment), ISRM (International Society for Rock Mechanics) y JTC1 (Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 1), establecieron: Definiciones y terminología para uso internacional; Descripciones de tipos y niveles de zonificación de derrumbes; Orientación sobre la zonificación de los sitios de deslizamientos y su planificación. Utilizar si es necesario hacer frente a un evento de deslizamiento de tierra; Definiciones de niveles de zonificación y rangos sugeridos para zonificación y mapas, teniendo en cuenta las necesidades y objetivos de uso y planificación de la ocupación y los reguladores, y el propósito de la zonificación; Orientación sobre la confiabilidad, validez y limitaciones de los métodos; Asesoramiento sobre las calificaciones de los parámetros (Guimaraes-Silva 2015).

### **2.2.1 Susceptibilidad a deslizamientos de tierra.**

Guimaraes-Silva (2015) define la susceptibilidad como la probabilidad espacial de ocurrencia de un fenómeno en una área conocida (Área de estudio); Zuquette (1993) conceptualiza la susceptibilidad como la posibilidad de producirse un evento adverso en un área, haciendo referencia a evento adverso a los deslizamientos de tierra. Esta susceptibilidad depende de las características del área de estudio. La susceptibilidad se diferencia del riesgo, ya que, esta depende de los factores permanentes (material, topografía, etc.) del sitio, mientras que el riesgo depende de los factores variables (detonantes) como la lluvia o sismos.

Corominas et al. (2014) entiende la evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento de tierra, por medio de metodologías cualitativas y cuantitativas, como la posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento de tierra en un área.

---

### **2.2.2 Amenaza.**

Es de gran importancia la transferencia de ideas en torno al riesgo de deslizamiento de tierra, en cualquier lenguaje, por ello Varnes (1984) introdujo el término Hazard, el cual puede traducirse como peligro o amenaza, como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino en un área determinada, durante un tiempo determinado.

Zuquette (1993) Conceptualiza la amenaza como el peligro intrínseco de un sitio en función a los factores dinámicos (detonantes) de origen natural o antropológico. Este peligro se relaciona con las personas, propiedades o medio ambiente.

Corominas et al. (2014) define la amenaza como una condición en el ambiente que tiene un potencial de causar una consecuencia indeseable y la probabilidad de que ocurra en un determinado tiempo. Caracterizando la amenaza a deslizamiento de tierra con su ubicación, volumen o área que pueda afectar, clasificación del posible movimiento de masa y velocidades de los desprendimientos de tierra o cualquier tipo de material desprendido.

Highland and Bobrowsky (2008) afirma que la amenaza es el potencial de que ocurra un evento adverso refiriéndose a deslizamiento de ladera, causante de daños en un área específica.

### **2.2.3 Vulnerabilidad.**

El concepto de vulnerabilidad siempre se ha asociado a la amenaza y al riesgo. Guimaraes-Silva (2015) afirma que existía una pluralidad en tanto al concepto de vulnerabilidad hasta que con el paso del tiempo y el avance en la investigación de la mitigación del riesgo, ha tomado una

conceptualización más clara. A continuación, se presenta la **Tabla 2.2.3-1**: Evolución del concepto de vulnerabilidad a través de diferentes autores. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015) en la que Guimaraes-Silva (2015) presenta la evolución del concepto de la vulnerabilidad a lo largo del tiempo.

**Tabla 2.2.3-1:** Evolución del concepto de vulnerabilidad a través de diferentes autores. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015) (Modificado)

| Autor                    | Definición  |
|--------------------------|---|
| Gabor & Griffith (1980). | La vulnerabilidad es la amenaza (materiales peligrosos) a las que las personas se encuentran expuestas, incluyendo agentes químicos y ambientales.  |
| Timmerman (1981)         | La vulnerabilidad es la respuesta de un sistema frente a la excitación de un agente, que actúa adversamente contra el elemento. Medida de la capacidad del elemento para absorber y recuperarse frente a un evento adverso.             |
| Susman, et al. (1983)    | La vulnerabilidad es el grado de riesgo en el que las clases sociales se pueden diferenciar.  |
| Varnes (1984)            | La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo, provocado por la ocurrencia de un fenómeno natural, con magnitud conocida. Expresada en una escala de cero (sin pérdida) a uno (pérdida total). |
| Mitchell (1989)          | Potencial de perdida  |
| Zuquette (1993)          | Característica inherente de un objeto, sistema o elemento que se encuentra expuesto a amenaza (evento adverso), Los cuales son  |



---

susceptibles a pérdidas. Expresada en una escala de cero (sin pérdida) a uno (pérdida total).

Fell (1994) Grado de pérdida para un determinado elemento o conjunto de elementos que se encuentran dentro de un área afectada por uno o más deslizamientos. La vulnerabilidad es expresada en una escala de cero (sin pérdida) a uno (pérdida total). Sugiere que la vulnerabilidad ( $V$ ) es determinada a partir de la (Eq. 2.2.4-1)

$$V = V_s * V_t * V_l \quad (\text{Eq. 2.2.4-1})$$

Donde

$V_s$ : Probabilidad de impacto espacial.

$V_t$ : Probabilidad de impacto temporal.

$V_l$ : Probabilidad de que un individuo pierda la vida dentro del área impactada.

Canuti, Casagli, & idrogeologiche (1996) Grado de pérdida de un elemento expuesto a un riesgo (fenómeno natural) con determinada intensidad. La vulnerabilidad es expresada en una escala de cero (sin pérdida) a uno (pérdida total) al igual que la intensidad del fenómeno y la naturaleza de los elementos que se encuentran en riesgo.

IUGS-WGL (1997) Grado de pérdida potencial para un elemento o grupo de elementos dentro de un área afectada por deslizamiento de tierra.

Cardona (2001) Predisposición de un elemento a ser afectado, destruido o dañado por la ocurrencia de un evento con intensidad conocida.

---

- Nogueira (2002) Es la susceptibilidad de los elementos, que se encuentran en un área de amenaza, donde sufren daño por un evento adverso, debido a su fragilidad física frente a la del evento y la incapacidad del elemento de absorber el impacto. Esta susceptibilidad se condiciona de acuerdo con las características intrínsecas de cada uno de los elementos expuestos.
- ISSMGE TC32  
(2004) Grado de pérdida de un elemento específico o conjunto de elementos dentro de un área afectada por un evento adverso (amenaza). expresada en una escala de cero (sin pérdida) a uno (pérdida total). Teniendo en cuenta un conjunto de factores sociales, económicos y ambientales que favorecen o desfavorecen la susceptibilidad de la comunidad frente a la amenaza.
- Highland and  
Bobrowsky  
(2008) Valor de las pérdidas para un elemento dado, o un conjunto de elementos dentro de un área afectada por la amenaza, expresada en una escala de cero (sin pérdida) a uno (pérdida total). El cual considera condiciones físicas, sociales, económicas y ambientales.
- ISSMGE JTC-1.  
(2008) La vulnerabilidad se define como el nivel de pérdidas esperadas en un elemento o sistema en relación con una amenaza específica.
- Westen &  
Greiving . (2017) Determinadas condiciones físicos, sociales, económicos y desarrollo de factores o procesos que incrementan la susceptibilidad del impacto de la amenaza a una comunidad. Esta vulnerabilidad puede ser subdividida en física, social, económica y ambiental.
- Wong, Ho, &  
Chan (2018) Definida como el nivel de daño potencial o grado de pérdida o un conjunto de elementos. Debido a deslizamientos de tierra.
-

Investigadores de diferentes áreas a fines, utilizan múltiples definiciones y diferentes marcos conceptuales para definir la vulnerabilidad (Pichardo 2004) . Desde el punto de vista de las ciencias naturales, la vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos en el área afectada por su respectiva amenaza de acuerdo con Corominas et al. 2014; Desde el punto de vista económico, la perdida se relaciona con el valor relativo de los daños, siendo esta la probabilidad de fatalidad; En ciencias sociales existen diferentes definiciones para la vulnerabilidad de acuerdo a la escala y el propósito del análisis (Fuchs, Heiss, and Hübl 2007; Tapsell et al. 2010).

Guimaraes-Silva (2015) citando a Pichardo (2004) define diferentes perspectivas del concepto de vulnerabilidad.. En la **Tabla 2.2.3-2:** Concepto de vulnerabilidad a partir de otras disciplinariades. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015) citando a Pichardo (2004). se presenta el concepto de vulnerabilidad a partir de otras áreas disciplinares.

**Tabla 2.2.3-2:** Concepto de vulnerabilidad a partir de otras disciplinariades. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015) citando a Pichardo (2004).

| Tipo de Vulnerabilidad. | Definición   |
|-------------------------|--|
| Ecológica.              | Se define por medio de las condiciones ambientales y ecológicas en el área que se encuentra en amenaza.  |
| Económica.              | Definida por los diferentes indicadores económicos de desarrollo que presenta una comunidad.   |
| Física.                 | Se refiere a la susceptibilidad que tiene os asentamientos humanos inadecuados en zonas de amenaza, con un conjunto de obras e infraestructura inadecuada para la dispersión de los efectos de la amenaza. |

---

|                |  |
|----------------|--|
| Institucional. | Definida por la presencia o ausencia de entes gubernamentales, organizaciones o comités que garanticen una gestión y organización a situaciones que amenacen a la población. Capacidad de los dirigentes para responder una emergencia a una catástrofe de diferente índole. |
| Natural.       | Vulnerabilidad inherente de los seres humanos frente a la amenaza del medio ambiente.  |
| Política.      | Nivel de autonomía que posee una comunidad para la toma de decisiones que influye en las vidas de grupo humano.  |
| Social.        | Refiere al nivel de organización y rigidez que posee la sociedad para relacionarse entre ellos.  |
| Técnica.       | Hace referencia a la presencia o ausencia de obras civiles que puedan resistir o adaptarse a la amenaza, a la que están expuestas.   |

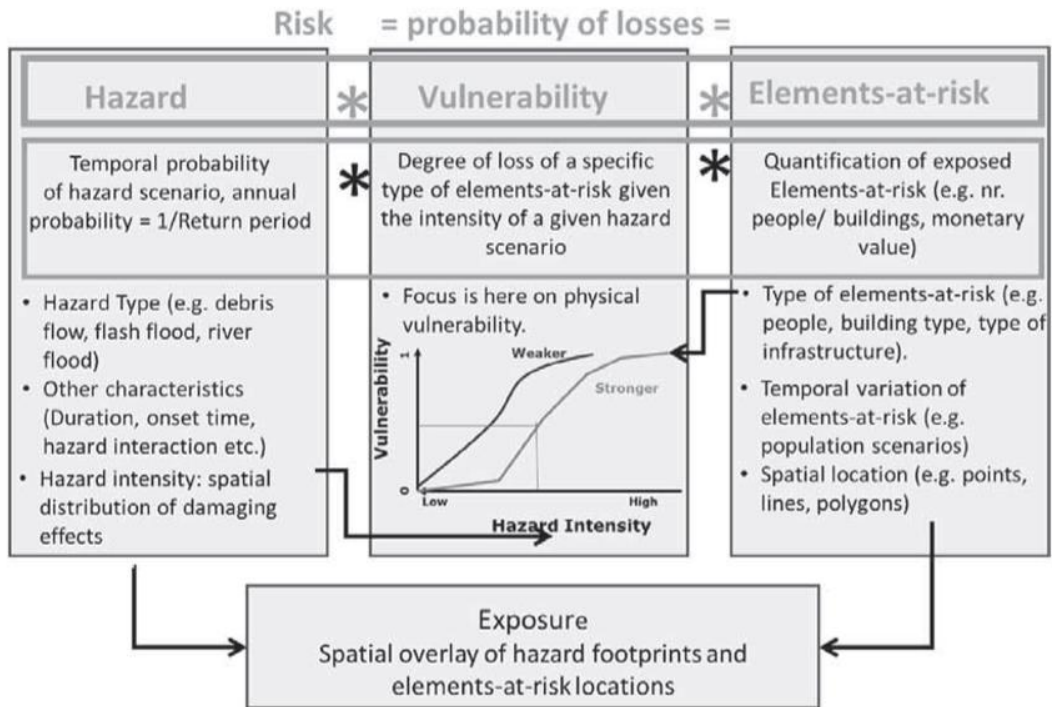
---

#### 2.2.4 Riesgo.

El término riesgo ha tenido diferentes apreciaciones a lo largo del tiempo, el cual se encuentra en una continua evolución. Bizottság (2010) y ISDR (2009) basándose a partir de la definición de Varnes (1984), estandariza el concepto de riesgo para los países que hacen parte de la Unión Europea, como la probabilidad de las consecuencias dañinas o pérdidas (muertes, lesiones, bienes, actividades económicas interrumpidas o destruidas por el medio ambiente), resultado de la interacción entre la amenaza natural o amenaza inducidas por el hombre y las condiciones de vulnerabilidad que existan en el área de estudio. La **Figura 2.2.4-1** esquematiza el riesgo

como la multiplicación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de los elementos expuestos. Indicando la interacción entre los diversos aspectos de los parámetros para determinar el riesgo.

**Figura 2.2.4-1:** Determinación del riesgo a partir de (Bizottság 2010; ISDR 2009).



Tomado de (Westen and Greiving 2017).

Zuquette (1993) define el riesgo como la probabilidad de que ocurran pérdidas (económica, social y ambiental), valorando el riesgo entre normal o aceptable de acuerdo con el sitio de estudio, durante un cierto período de tiempo. Considera el resultado del riesgo la relación entre amenaza y vulnerabilidad de los elementos expuestos (seres humanos, residencias, entre otros).

Corominas et al. (2014) recomienda que la evaluación del riesgo de un deslizamiento para un objeto o área, debe calcularse a partir de un marco de referencia temporal para el cual se evalúa le frecuencia esperada en la que ocurra un evento de intensidad mayor de acuerdo con un valor mínimo establecido. Arroja resultados en índices ponderados, rangos relativos (bajo,

moderado y alto) o clasificación numérica. Llamando la metodología QRA (Quantitative risk analysis).

AGS (2007) indica que el riesgo es una medida de la probabilidad y de la gravedad de un evento con efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente. Estimando el riesgo como el producto de la probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias.

Los entes gubernamentales y tomadores de decisiones necesitan el desarrollo de mapas en los que se identifiquen áreas que puedan verse afectadas por deslizamientos de tierra para consideraciones en los planes de desarrollo e implementar medidas adecuadas para la mitigación del riesgo (Corominas et al. 2014). En el momento se dispone de una amplia variedad de metodologías para la evaluación del riesgo de deslizamientos, en donde diferentes instituciones y sociedades científicas han propuesto directrices para la preparación de mapas de riesgo a deslizamientos (GEO 2006; AGS 2007; OFAT, OFEE, OFEFP, Lateltin 1997) por lo que en la primera década del siglo XXI, debido al avance tecnológico, los estudios académicos realizados que evalúan el riesgo asociado a deslizamiento de ladera, en su mayor parte, tienden a tener un enfoque cualitativo (Guimaraes-Silva 2015).

Robin Fell et al. (2008) alerta la importancia y necesidad del desarrollo de la gestión del riesgo por medio de métodos cuantitativos para el análisis de los movimientos de masa, variabilidad de la amenaza, y consecuencias, para la determinación del riesgo. Estos estudios cualitativos han sido impulsados por el desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y desarrollos metodológicos de zonificación del riesgo más sofisticados (Guimaraes-Silva 2015).

Para una evolución del riesgo de una determinada situación, se hace necesario conocer la susceptibilidad que posee el área, el tipo de amenaza al cual es susceptible, grado de exposición y la vulnerabilidad que posee.

---

La Ley 1523 (2012), indica que *“el análisis del riesgo implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir, mediante la relación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de la amenaza y la vulnerabilidad, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales, y sus probabilidades. Como resultado de la etapa de análisis del riesgo, se obtiene una estimación de daños, costos asociados y pérdidas potenciales”* tomado de (Servicio Geológico Colombiano 2015)

De acuerdo con la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (2015) para Colombia el riesgo es *“la Medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente. Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socionatural, o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. Según la manera como se defina el elemento en riesgo, el riesgo puede medirse según la pérdida económica esperada, según el número de vidas perdidas o según la extensión del daño físico a la propiedad”*.

Por otra parte, diferentes autores hacen la evaluación del riesgo enfocándose en aspectos climático o atmosféricos (Kates 1980); Evaluando e identificando procesos vinculados con inundaciones y erosión para la evaluación del riesgo hidrológico (Levillain 1987); Evaluando los peligros naturales en función a la interacción de procesos exógenos entre la hidrosfera y astenosfera para el desarrollo de diferentes tipos de riesgos ambientales (Augusto Filho, CERRI, & Amenomori 1990); Evaluación del riesgo a partir de las lluvias como parámetro detonante para deslizamientos de ladera (Aristizábal, Martínez, & Vélez 2010); Por último, Cerri & Amaral (1998) realizan una clasificación de riesgos ambientales subdividiéndolos en riesgo físico y biológico. Donde el riesgo físico lo evalúan por medio de la amenaza atmosférica, geológica e hidrológica para la obtención del riesgo de cada una de las amenazas. Y el riesgo biológico lo evalúa por medio de la fauna y la flora.

## 2.3 Evaluación de la vulnerabilidad.

La evaluación de la vulnerabilidad hace parte de uno de los componentes más importantes para la estimación del riesgo (Einstein 1988; Leone, Asté, and Leroi 1996; Varnes 1984).

La estimación de la vulnerabilidad a deslizamientos de tierra ha tenido una inclinación de análisis cualitativo y subjetivo, basándose en gran medida de registros históricos de eventos que han ocurrido en diferentes partes del mundo (Dai, Lee, and Ngai 2002). Como el trabajo realizado por Finlay (1996) que proporciona rangos y valores de vulnerabilidad de las personas en un espacio abierto, en un vehículo o en un edificio a partir de registros históricos de eventos de deslizamientos en Hong-Kong.

Se ha realizado una investigación extensa para cuantificar el riesgo a deslizamiento de tierra, en estas investigaciones las consecuencias de la amenaza y la evaluación de la vulnerabilidad han sido limitadas (Corominas et al. 2014). Por lo que no existe una metodología definida que obtenga la vulnerabilidad para diferentes tipos de amenaza (Guimaraes-Silva 2015).

Guimaraes-Silva (2015) aclara que, el cálculo de la vulnerabilidad tiene variables medibles y no medibles. Donde cualquier intento de comprender la vulnerabilidad y cada uno de sus factores que lo controlan, deben ser separados, para así, obtener información acerca de la población, área, infraestructura, datos económicos, etc. Logrando obtener una amenaza y resistencia de la comunidad, en el momento que ocurra el evento. Los elementos que definen la vulnerabilidad se logran subdividir, de acuerdo con la perspectiva que representan, en elementos expuestos, elementos resistentes y elementos resilientes(Guimaraes-Silva 2015). En la **Tabla 2.3-1** se describe cada uno de los elementos que definen la vulnerabilidad.



**Tabla 2.3-1:** Elementos que definen la vulnerabilidad. Tomado de: Guimaraes-Silva (2015)

| Elemento.    | Definición.  |
|--------------|--|
| Resistentes. | Son directamente asociados con las características de los edificios cuando nos referimos a vulnerabilidad física o de movilidad humana en términos de vulnerabilidad social. |
| Expuestos.   | Son los que se encuentran directamente asociados con la ubicación geográfica del elemento con respecto a la amenaza.   |
| Resilientes. | Son los que directamente asociados con la capacidad del elemento golpeado por la amenaza a recuperarse de acuerdo con los atributos que los definen.                         |

Li et al. (2010) afirma que la estimación de la vulnerabilidad implica el análisis de la interacción entre la intensidad del deslizamiento y los elementos que se van a ver afectados por la amenaza. Zuquette et al. (1995) ha propuesto diferentes metodologías para la evaluación y zonificación de la vulnerabilidad. Enfocándose en los procesos que ocurren en los factores constantes de los deslizamientos de ladera. Glade and Crozier (2005) propone una metodología unificada para clasificar y evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad de elementos que se encuentran en amenaza a diferentes magnitudes de deslizamientos específicos.

Cuando se habla de cuantificar la vulnerabilidad, se logra expresar en términos monetarios ya sean absolutos o relativos, sobre el valor del elemento expuesto, como PIB per cápita, número de muertos, o utilizando otro tipo de indicadores. (Corominas et al. 2014), El grado de pérdida es la suma de las pérdidas directas e indirectas. En la **Tabla 2.3-2** se presenta los diferentes

tipos de vulnerabilidad evaluadas en la literatura para deslizamientos de tierra, además del modo de cuantificación.

**Tabla 2.3-2:** Tipos de vulnerabilidades. Tomado y modificado de (Corominas et al. 2014)

| Vulnerabilidad | Definición  |
|----------------|---|
| Física         | Esta se refiere a los daños directos e indirectos que sufrió un edificio, servicios públicos e infraestructura de una ciudad. Donde el impacto monetario es fácil de determinar para las infraestructuras. Además, la vulnerabilidad de los elementos físicos se puede expresar en términos de extensión, grado o el costo de reparación del daño, como resultado del evento. (Corominas et al. 2014).                      |
| Persona        | Relaciona el evento de deslizamiento de tierra con el número de muertos o lesionados que este ocasionó. Los valores monetarios se asignan de acuerdo con la lesión o pérdida de la vida (en términos del valor del seguro) o calidad de vida reducida. Otros impactos debido a un deslizamiento de tierra que son mucho más difícil de cuantificar son los relacionados con implicaciones sociales. (Corominas et al. 2014) |

Además, cuando se habla de cuantificación de la vulnerabilidad de un elemento en riesgo, esta puede cuantificarse a partir de índices de vulnerabilidad o curvas de vulnerabilidad. El índice de vulnerabilidad expresa el grado de daño de en una escala de cero (sin daño) a uno (daño total) relativa. Mientras que las curvas de vulnerabilidad expresan la probabilidad que un deslizamiento de tierra (amenaza) con una determinada intensidad, alcance o sobrepase cierto estado de daño (leve, moderado, extenso, completó)(Corominas et al. 2014).

Los procedimientos presentes en la literatura para el desarrollo de curvas de vulnerabilidad, están propuesto para terremotos, los cuales también pueden ser modificados para el uso de estas metodologías en deslizamientos de tierra(Botero Fernández 2009; Nielson and DesRoches

---

2007; Rojahn and Sharpe 1985; Corominas et al. 2014). Como el trabajo realizado por Botero Fernández (2009), el cual propone una metodología aplicada a la ciudad de Medellín, Colombia, para lograr cuantificar la vulnerabilidad en función a eventos sísmicos. La metodología es posible modificarla para que sea aplicable a casos de los deslizamientos de tierra, donde la evaluación de vulnerabilidad es enfocada en centros urbanos en riesgo a desastres naturales. Esta tiene dos vías de desarrollo, una teórica y otra práctica. La teórica evalúa la vulnerabilidad a partir de información recolectada de datos históricos y encuestas realizadas. Proporcionando información para obtener indicadores de vulnerabilidad.

Por otro lado, la vía práctica, realiza la evaluación de la vulnerabilidad haciendo uso de casos históricos ocurridos como base, haciendo un procedimiento inverso al teórico; Por lo que se inicia evaluando la información disponible, generando información relevante en la evaluación de indicadores específicos, con el fin de obtener la vulnerabilidad local a partir de la capacidad estructural de las edificaciones involucradas.

Las metodologías utilizadas para cuantificar la vulnerabilidad de elementos expuestos a deslizamientos de tierra pueden clasificarse de acuerdo con la información que se encuentra (utilizando datos de eventos históricos), o de acuerdo con los datos de entrada y la respuesta (evaluación heurística), y con el uso de modelos físico-analíticos. En la Tabla 2.3-3, se presentan las evaluaciones de diferentes investigadores que usan los modelos heurísticos, en la Tabla 2.3-4; Error! No se encuentra el origen de la referencia. modelos analíticos y la Tabla 2.3-5 presenta los métodos basados en eventos históricos.



**Tabla 2.3-3:** Evaluación de la vulnerabilidad con métodos Heurísticos. Tomado, modificado y actualizado de: Corominas et al. (2014)

| Elementos expuestos.  | Mecanismo de falla.                | Escala de aplicación. | de Metodología.  | Referencia           |
|---|------------------------------------|-----------------------|--|----------------------|
| Edificaciones, vías, personas dentro y fuera de edificios.  | Flujo de escombros, Caída de rocas | Local y Regional.     | Parametrización de valores fijos para eventos de deslizamiento con diferentes periodos de retorno. | Bell & Glade (2004)  |
| Personas que se encuentran al interior de vehículos y edificación, al igual que en espacios abiertos. | Flujo de escombros, Caída de rocas | Local y Regional.     | Valores fijos observados de registros históricos de deslizamientos ocurridos en Hong Kong.         | Finlay (1996)        |
| Vías.   | Flujo de escombros.                | Regional.             | Evaluación estadística de datos recopilados para la construcción de curvas de vulnerabilidad.      | Winter et al. (2014) |

**Tabla 2.3-4:** Evaluación de la vulnerabilidad a partir de modelos físico-analíticos. Tomado, modificado y actualizado de: Corominas et al. (2014)

| <b>Elementos expuestos.</b>                | <b>Mecanismo de falla.</b> | <b>Escala de aplicación.</b>       | <b>Metodología.</b>   | <b>Referencia</b>                     |
|--|----------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Edificaciones Reforzadas.                  | Cáida de roca.             | Sitio específico y local.          | Por medio de elementos finitos, evalúa el potencial de colapso de una columna reforzada, produciendo una matriz de vulnerabilidad y curvas asociadas con con la energía de impacto que tiene deslizamiento sobre el elemento en función de de la ubicación del impacto.                       | Mavrouli & Corominas (2010a, b)       |
| Edificaciones Reforzadas.                  | Deslizamientos lentos      | Sitio específico.                  | Cuantifica el daño que produce un deslizamiento de ladera detonado por un terremoto, utilizando un modelo de pendientes finitas y el método de diferencias finitas. Análisis paramétrico y evaluación estadística para la construcción de las curvas de vulnerabilidad.                       | Fotopoulou & Pitilakis (2013b, 2013a) |
| Edificaciones Reforzadas.                  | Deslizamientos lentos.     | Sitio específico.                  | Simulaciones numéricas por medio de de análisis de terremotos para el desarrollo de curvas de vulnerabilidad asociadas a asentamientos diferenciales.   | Negulescu & Foerster (2010)           |
| Edificaciones no reforzadas                | Flujo de escombros.        | Sitio específico, local y regional | Respuesta dinámica de estructuras simples a la excitación de terremotos, contrayendo curvas de vulnerabilidad asociadas a la interacción entre la fuerza de impacto que tiene el deslizamiento y el elemento expuesto.  | Haugen & Kaynia (2008)                |
| Edificaciones Reforzadas y en mampostería. | Flujo de escombros.        | Sitio específico, local y regional | Evaluación probabilística de daños mediante el cálculo de resistencia de los elementos estructurales de la edificación. Usando el modelo de Montecarlo para la variación de la tipología de las estructuras. Contrayendo curvas de vulnerabilidad a partir de la fragilidad de los elementos. | Zuccaro et al. (2011)                 |

|   |                     |                           |   |                        |
|---|---------------------|---------------------------|---|------------------------|
| Edificaciones reforzadas y no reforzadas. | Flujo de escombros. | Sitio-específico y local. | Respuesta de las edificaciones que interactúan con deslizamientos de tierra en Corea del Sur. Relación entre el grado de daño sufrido por el edificio y la intensidad del deslizamiento, a través de datos de campo, espaciales y formulas empíricas. | Kang and Kim (2016)    |
| Edificaciones reforzadas y no reforzadas. | Flujo de escombros. | Sitio específico y local. | Respuesta de las edificaciones que interactúan con los deslizamientos de tierra, a partir de la geometría que presenta el talud y la resistencia del elemento expuesto.   | Guimaraes-Silva (2015) |

**Tabla 2.3-5.-** Evaluación de la vulnerabilidad a partir datos históricos. **Tomado, modificado y actualizado de:** Corominas et al. (2014)

| Elementos expuestos. | Mecanismo de falla. | Escala de aplicación.    | Metodología.  | Referencia   |
|----------------------|---------------------|--------------------------|---|--|
| Edificios            | caída de rocas.     | Sitio específico, local. | Análisis de regresión de datos de los daños debido a eventos de deslizamiento de roca. Cuantificación de la vulnerabilidad asociada con la energía de impacto expresada por una función Sigmoide.   | Federico Agliardi, Crosta, & Frattini (2009 a, b).     |
| Edificios            | Flujo de escombros. | Sitio específico, local. | Análisis de regresión de datos de los daños debido a deslizamientos de tierra, junto con, información de la modelación de la vulnerabilidad asociada con la altura acumulada o presión de impacto o viscosidad cinemática. Expresada en una función Sigmoide. | Jakob (2012); Quan Luna et al. (2011)                  |
| Edificios            | Varios tipos.       | Regional.                | Análisis probabilístico basado en la aproximación de incertidumbres de segundo orden. Obteniendo un valor de vulnerabilidad para el área de estudio.  | Kaynia et al. (2008); Lacasse et al. (2008); Li et al. |

|                             |   |                   |  |   |
|-----------------------------|---|-------------------|--|---|
|                             |   |                   |  | (2010); Uzielli et al. (2008)   |
| Edificios                   | Flujo de escombros.                             | Local y regional. | Cálculo de una función por medio de una regresión de datos de eventos ocurridos, con la correlación de la altura de los desechos del deslizamiento.  | Fuchs (2008); Fuchs, Heiss, & Hübl (2007); Papatoma-Köhle et al. (2015) |
| Edificios, personas y vías. | Flujo de escombros.                             | Regional          | Análisis probabilístico de recurrencia de un deslizamiento de tierra, por medio de regresión de datos, La vulnerabilidad de los elementos expuestos cerca del deslizamiento se definió como 1, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos más alejados del área susceptible al evento adverso fue 0.1.                               | Michael-Leiba et al. (2003)   |
| Edificios, personas         | Flujo de escombros, avalanchas, caída de rocas. | Regional y local. | Análisis probabilístico, Relaciona la ocurrencia de un evento por medio de periodos de retorno y el daño que causaría. Clasificando la vulnerabilidad por medio de grados y escala del estudio. La vulnerabilidad física el autor la evalúa por medio de la intensidad del deslizamiento de acuerdo con el tipo de movimiento de tierra. | Borter (1999)   |
| Edificaciones.              | Flujo de escombros.                             | Regional.         | Análisis de regresión de datos de los daños ocurridos en Suiza por movimientos de tierra. Obteniendo valores de vulnerabilidad de las estructuras, basándose en el costo del seguro de la edificación, reconstrucción y el daño que tuvo el elemento.  | Romang (2004)   |
| Edificios.                  | Flujo de escombros.                             | Regional y Local. | Análisis de regresión de datos, de derrumbes ocurridos en Nilgiri India, Relacionando los elementos expuestos ubicados cerca de áreas de ruptura o trayectorias de movimientos de masa.  | Jaiswal, Van Westen, & Jetten (2011)                                    |



### 2.3.1 Modelo T para la evaluación de la vulnerabilidad.

Es una metodología propuesta por la Profesora Guimaraes-Silva (2015) para la evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras a partir de la intensidad medida por medio del gradiente modificado Z Eq (2.3.1) y la capacidad de resistencia de los elementos expuestos a deslizamiento de tierra.

$$Z = \frac{H}{a} \quad \text{Eq (2.3.1)}$$

El gradiente modificado representa la intensidad del deslizamiento y es la variable que controla de forma considerable la vulnerabilidad. Donde H es la diferencia entre la cota del punto de inicio del deslizamiento, la cota inferior en donde termina el deslizamiento y d la distancia total recorrida por el deslizamiento hasta el centro de gravedad de la estructura impactada.

Por medio de parámetros de fácil acceso y en busca de un significado físico-matemático para la modelación de la vulnerabilidad física propone la relación entre el gradiente modificado y la resistencia de la estructura expuesta al evento adverso. Esta relación la denominó como T Eq (2.3.1-1) Guimaraes-Silva (2015).

$$T = \frac{H}{R} \quad \text{Eq (2.3.1-1)}$$

Siguiendo el Principio de Proporcionalidad propuesto por Juárez-Badillo (2010), para describir el fenómeno de la vulnerabilidad por medio de ecuaciones matemáticas sencillas, determina que la vulnerabilidad física de estructuras depende de la función de T para describir la interacción entre la masa deslizante y la resistencia de la estructura. Obteniendo como ecuación matemática que describe el fenómeno la Eq (2.3.1-2).

$$V = \frac{V_T}{1 + \left(\frac{V_T}{V_1} - 1\right) * \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta}} \quad \text{Eq (2.3.1-2)}$$

La Eq (2.3.1-2) fue calibrada a partir de los datos observados del área de estudio del municipio de Nova Friburgo, Brasil. Obtenido un valor de control V1 que ajusta la variable de control T1 para los casos de estudio. Logrando que el valor de T1 sea 0,55 en los casos donde la vulnerabilidad asume valore de 0,5. Obteniendo así, una ecuación matemática que sea directamente proporcional a T, que sea capaz de cuantificar la vulnerabilidad física de elementos

estructurales expuestos a deslizamientos de masa en condiciones similares a los del caso de estudio. Siendo esta descrita por la Eq (2.3.1-3).

$$V = \left[ 1 + \left( \frac{T}{0,55} \right)^{-3,5} \right]^{-1} \quad \text{Eq (2.3.1-3)}$$

Siendo  $\delta$  el coeficiente que gobierna la interacción entre el deslizamiento y la estructura. Calibrado a partir del análisis de datos de campo del área de estudio, siendo el valor de 3,5 el que mejor se ajusta a los datos.

A partir del desarrollo teórico matemático y físico para la obtención de la ecuación (2.3.1-3) la metodología fue aplicada en la región de la cordillera central, concretamente en el corregimiento de Santa Helena, Municipio de Antioquia. Obteniendo un mapa de vulnerabilidad de la zona.

---

## 3 Metodología.

Esta investigación se realizó con el fin de evaluar la vulnerabilidad física de estructuras por medio de un prototipo de laboratorio que permite un análisis de los parámetros que influyen en la interacción entre el deslizamiento y el elemento expuesto. Se discuten más adelante su aplicabilidad y sus limitaciones. Las base principales se toman de la investigación realizada por Li et al. (2010), donde la estimación de la vulnerabilidad envuelve el análisis de la interacción entre la intensidad del deslizamiento de ladera con sus correspondientes efectos, y de Guimaraes-Silva (2015), donde la geometría del talud juega un papel fundamental en la evaluación de la vulnerabilidad, además de hacer uso de la base teórica utilizada para la calibración del prototipo. Los parámetros iniciales necesarios para el diseño del modelo para este trabajo son de tipo experimental, que busca la construcción de curvas de vulnerabilidad a partir de la geometría del talud que se encuentra a amenaza de deslizamiento y la resistencia utilizada en el modelo a escala de laboratorio.

### 3.1 Diseño del modelo experimental a escala de laboratorio.

#### 3.1.1 Variables para el diseño del modelo experimental a escala de laboratorio.

Los parámetros fundamentales que se determinaron para el diseño del prototipo fueron la pendiente del deslizamiento, el cual contiene la cota donde parte el deslizamiento, la cota menor de este y la distancia recorrida del movimiento, la cuales son sencillas de obtener. La pendiente de la ladera hace parte de un factor predisponente de deslizamiento (Capitani, Ribolini, and Bini 2013). Adicionalmente, es un parámetro sencillo de calcular, obtener en campo, modelar y dimensionar para el diseño del prototipo.

Para iniciar el dimensionamiento preliminar del modelo se hizo uso del banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Nova Friburgo, Brasil, en Enero del 2011 tomados de Guimaraes

Silva (2015), y los deslizamientos ocurridos en Corea del Sur entre Julio y Agosto del 2011 tomados de (Kang and Kim 2016) para obtener valores de los parámetros de los que se van hacer uso para el diseño y dimensionamiento del modelo. Siendo los parámetros:

1. La cota de donde parte el deslizamiento y la cota menor del deslizamiento.
2. La distancia entre el centro de gravedad de la estructura y la cota menor del deslizamiento.
3. La distancia real recorrida por el deslizamiento.
4. A partir de la diferencia entre la cota mayor y menor del deslizamiento del banco de datos se obtiene que esta diferencia no supera los 100 m. Siendo este un parámetro inicial para el dimensionamiento.

Para el dimensionamiento de la estructura por la que se va a deslizar el material se hace uso de la conservación de la cantidad de movimiento lineal, ya que se busca que el material se mueva a través de la rampa con fluidez. Para lograr que la cantidad de movimiento lineal de una partícula se conserve es necesario mantener una condición aparente sobre la base de la segunda ley de Newton (Orellana et al. n.d.). Si la fuerza que actúa sobre la partícula es cero, entonces la cantidad de movimiento inicial y en un tiempo posterior, son iguales, logrando que la cantidad de movimiento se conserve. Para lograr simular esta situación lo más viable es dimensionar la estructura basándose en el tamaño máximo del material deslizante, ya que a medida que disminuye el tamaño de la partícula con respecto a la sección transversal de la rampa disminuye la fuerza resultante opuesta al movimiento. Donde el tamaño de la estructura debe ser 100 veces mayor que el tamaño máximo de la partícula para evitar condiciones de borde y que la fuerza que actúa sobre la partícula sea nula. Por lo tanto, se determina que la escala a la cual se debe diseñar y construir el modelo a partir del banco de datos de los deslizamientos es de 1:100 con la condición de que el material el cual debe ser usado para modelar los deslizamientos tenga un tamaño máximo de 100 veces menor al tamaño de la estructura.

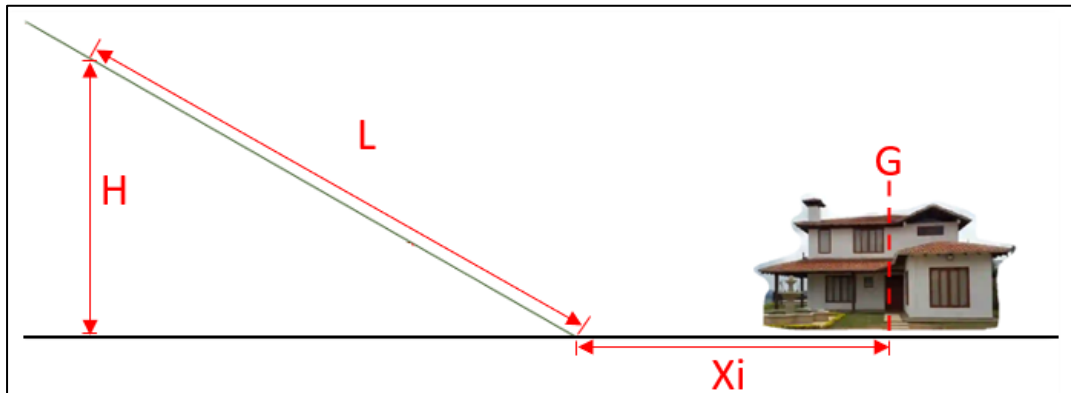
Para comprender la interacción e influencia que tiene la geometría del talud sobre la vulnerabilidad del elemento se hace uso del gradiente modificado el cual es propuesto por Guimaraes-Silva (2015). El gradiente modificado es la relación entre las siguientes variables:

- H: Diferencia entre la cota de donde parte el deslizamiento y la cota menor del deslizamiento.
- D: Distancia real recorrida por el deslizamiento, distancia entre el centro de gravedad de la estructura y el punto de inicio de la masa deslizante.  $L+xi$
- Z: (Gradiente modificado) Es la relación entre la altura (H) y la distancia real recorrida (d).

$$Z = \frac{H}{d} \quad (\text{Eq. 3.1.1})$$

En la **Figura 3.1.1-1** representa gráficamente las variables que se levantan de cada uno de los deslizamientos que se evaluarán para la evaluación del gradiente modificado. El cual corresponde al comportamiento de la energía potencial y cinética involucrada en el movimiento del deslizamiento para el cálculo de la vulnerabilidad (Guimaraes-Silva 2015).

**Figura 3.1.1-1:** Geometría necesaria para la construcción de las curvas de vulnerabilidad. Construcción propia.



### 3.1.2 Material de la masa deslizante.

La caracterización del material, se realizará a partir de la clasificación de movimientos de masa propuesta por Varnes (1978) modificada por Cruden & Varnes (1996), donde el tipo de material

deslizante es función del tipo de deslizamiento mostrado en la **Tabla 3.1.2-1**, y en virtud de la condición estipulada para el dimensionamiento del prototipo.

**Tabla 3.1.2-1:** Tipos de movimientos de masa de acuerdo con el material transportado. Tomado de Varnes (1978) modificada por Cruden & Varnes (1996)

| Tipo de movimiento                    | Tipo de material                                      |  |                          |
|---------------------------------------|---|--|--------------------------|
|                                       | Roca  | Grueso granulares                          | Fino Granulares          |
| Caída                                 | Caída de rocas  | Caída de escombros                         | Caída de tierra          |
| Deslizamiento rotacional              | Desplome de roca                                      | Derrumbe de escombros (debris topple)      | Derrumbe de tierra.      |
| Deslizamiento traslacional            | Deslizamiento de bloques de roca                      | Deslizamiento de escombros (Debris Slump). | Deslizamiento de tierra. |
| Propagación lateral (lateral Spreads) | Propagación de roca                                   | Propagación de escombros.                  | Propagación de tierra.   |
| Flujos                                | Flujo de roca (depp creep)                            | Flujo de escombros                         | Flujo de tierra.         |
| Complejos                             | Combinación de dos o más tipos de movimientos de masa |  |                          |

De acuerdo con la **Tabla 3.1.2-1** la evaluación en el modelo se realizó con fino granular. Debido a que este comprende todos los tipos de movimientos en base a la clasificación de Varnes (1978) modificada por Cruden & Varnes (1996). Además, al hacer uso de este material se contempla un mayor volumen de este para la modelación. Debido a esto, el material utilizado en las simulaciones se trata de Arena de Ottawa, material estandarizado. El hecho que sea estandarizado favorece el desarrollo de este trabajo y posibles investigaciones futuras. El material utilizado se caracterizó por medio de ensayos, índices tales como granulometría, humedad y gravedad específica, siguiendo los lineamientos de la ASTM.

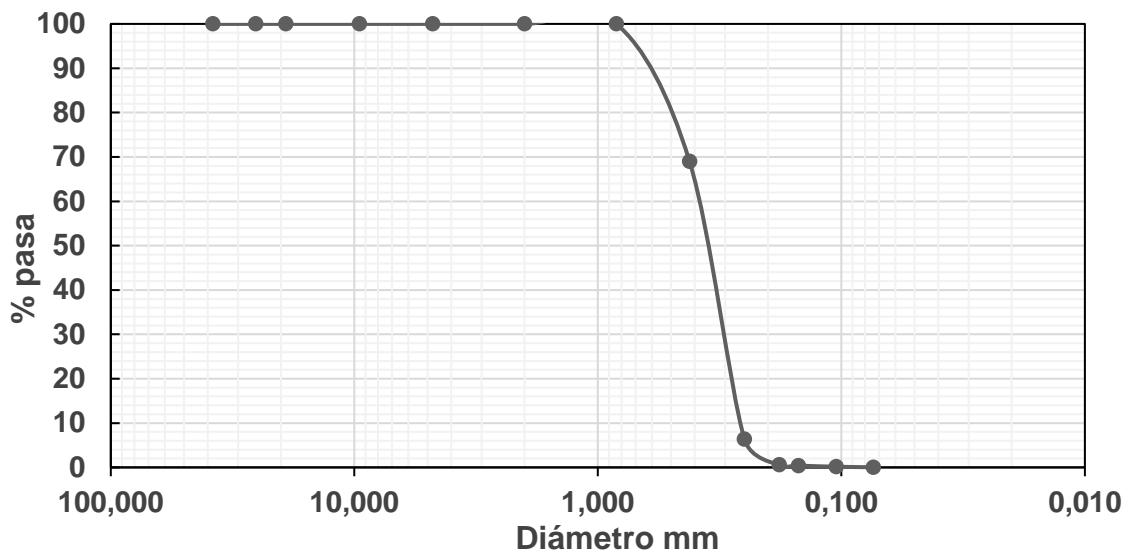
Los resultados obtenidos del ensayo de granulometría de la **Tabla 3.1.2-2** y la **Gráfica 3.1.2-1**. Los cuales, de acuerdo a la clasificación ASTM (2007), el suelo es una arena limpia mal gradada SP.

**Tabla 3.1.2-2:** Resultado del análisis granulométrico del material deslizante en el prototipo a escala.

| Fecha de realización |          | 7/02/2020     |            |            |           |
|----------------------|----------|---------------|------------|------------|-----------|
| Tamiz                | Abertura | Masa retenida | % Retenido | %Acumulado | %Que pasa |
|                      | mm.      | Wret (gr)     | %          | %Acum      | %pasa     |
| 3"                   | 76,2     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| 2"                   | 50,8     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| 1 1/2"               | 38,1     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| 1"                   | 25,4     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| 3/4"                 | 19,1     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| 3/8"                 | 9,52     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| No. 4                | 4,76     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| No. 10               | 2        |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| No. 20               | 0,84     |               | 0,00       | 0,00       | 100,00    |
| No. 40               | 0,42     | 99,20         | 31,04      | 31,04      | 68,96     |
| No. 60               | 0,25     | 200,10        | 62,61      | 93,65      | 6,35      |
| No. 80               | 0,18     | 18,40         | 5,76       | 99,41      | 0,59      |
| No.100               | 0,15     | 0,60          | 0,19       | 99,59      | 0,41      |
| No. 140              | 0,105    | 0,80          | 0,25       | 99,84      | 0,16      |
| No. 200              | 0,074    | 0,40          | 0,13       | 99,97      | 0,03      |
| FONDO                | --       | 0,10          | 0,03       | 100,00     |           |

Peso Ss antes del Ensayo: 319,60

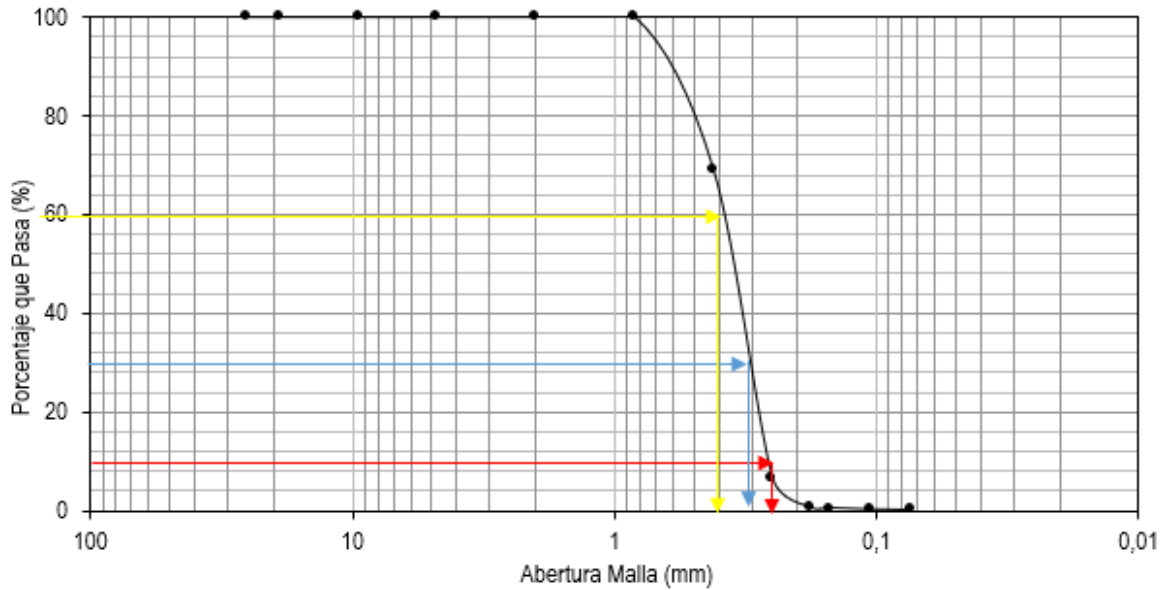
Peso Ss después del Ensayo: 319,60



Gráfica 3.1.2-1: Curva granulométrica del material deslizante.

|                      |      |                             |       |
|----------------------|------|-----------------------------|-------|
| Diámetro equivalente | mm   | Coefficiente de uniformidad | 1,428 |
| D10                  | 0,28 |                             |       |
| D30                  | 0,32 | Coefficiente de curvatura   | 0,914 |
| D60                  | 0,4  |                             |       |





**Gráfica 3.1.2-2:** Diámetro equivalente D10, D30 y D60 para la obtención de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

Conforme al subcapítulo 3.1.1 Variables para el diseño del modelo experimental a escala de laboratorio. El tamaño debe cumplir la condición que el tamaño máximo del material debe ser 100 veces menor al tamaño de la estructura. En correspondencia con la tabla anterior el 68,96% del material pasa la malla número 40 por lo tanto más del 50% del material tiene un tamaño menor a 0,42 mm logrando así cumplir la condición estipulada de una escala de 1:100.

El resultado obtenido al ejecutar el ensayo de humedad, indica que el contenido de humedad del material es de 0%. El procedimiento de cálculo se tabula en la **Tabla 3.1.2-3**

**Tabla 3.1.2-3:** Resultados del ensayo de humedad de la muestra.

| Parámetros                         | N° de tara |       |       |
|------------------------------------|------------|-------|-------|
|                                    | A126       | A186  | A67   |
| Masa de suelo húmedo + tara (gr.): | 33,45      | 54,47 | 40,40 |

|                                    |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| Masa de suelo seco + tara (gr.):   | 33,44 | 54,46 | 40,39 |
| Masa de tara (gr.):                | 24,52 | 25,23 | 19,13 |
| Masa de suelo seco (gr.):          | 8,92  | 29,23 | 21,26 |
| Masa de agua (gr.):                | 0,01  | 0,01  | 0,01  |
| contenido de humedad (%):          | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| contenido de humedad promedio (%): | 0,00  |       |       |

Por último, el ensayo de gravedad específica determina que el material tiene como peso específico de los sólidos un valor de 2,68. El procedimiento de cálculo se tabula en la **Tabla 3.1.2-4**. Donde los valores para arenas de acuerdo con Bardet (1997) oscilan entre 2,65 y 2,67.

**Tabla 3.1.2-4:** Gravedad específica del material.

| Parámetro | Picnómetro<br>1 | Picnómetro<br>3 |
|-----------|-----------------|-----------------|
| Mpw [gr]  | 667,5           | 667,43          |
| Mpws [gr] | 750,52          | 785,31          |
| Ws [gr]   | 132,1           | 188,4           |
| T°        | 21              | 21              |
| $\alpha$  | 0,9991          | 0,9991          |
| Gs        | 2,68            | 2,66            |
| GsProm    | 2,67            |                 |

Donde: Mpw masa del picnómetro junto con agua destilada y suelo, Mpws masa del picnómetro seco y suelo, Ws masa de los sólidos, Gs gravedad específica, y  $\alpha$  factor de corrección de temperatura calculado por medio de los valores típicos de Bardet (1997).

---

### 3.1.3 Diseño, materiales y construcción del modelo físico.

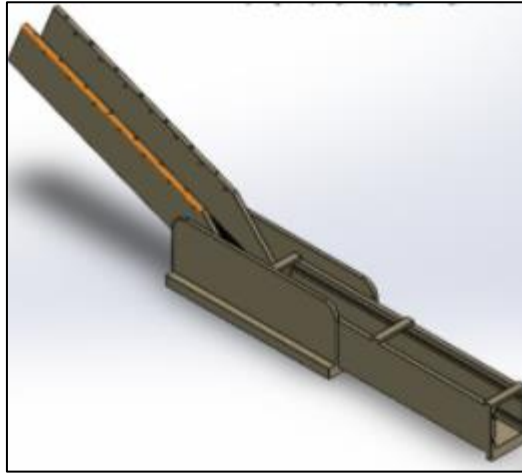
Este subcapítulo presenta el procedimiento realizado para el diseño preliminar y final del modelo para su posterior construcción.

#### 3.1.3.1 Diseño.

El Diseño del modelo se realizará en el software “Solid Works Students Edition”, el cual es una herramienta para el diseño de piezas, montajes y chapas. incluyendo dibujo automático, creación de vista explosionada, animación, procesamiento avanzado y simulación. Logrando centrarse más en los conceptos de ingeniería, diseño y construcción de lo que se desee crear.

En el caso de este trabajo, se diseñó un modelo general que comprende de una rampa en donde se desliza el material y una sección de impacto. Estos dos elementos poseen una sección transversal en U. Adicionalmente, la conjugación de estos dos elementos hace parte fundamentales para la evaluación de la intensidad de los deslizamientos para esta investigación. Como se dijo anteriormente la escala utilizada para el diseño del modelo en el software es 1:100. Dichos diseños se pueden observar en la **Ilustración 3.1.3.1-2**.

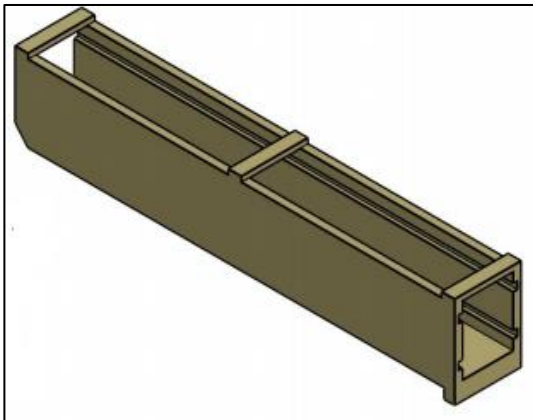
**Ilustración 3.1.3.1-2:** Diseño a escala del modelo de laboratorio.



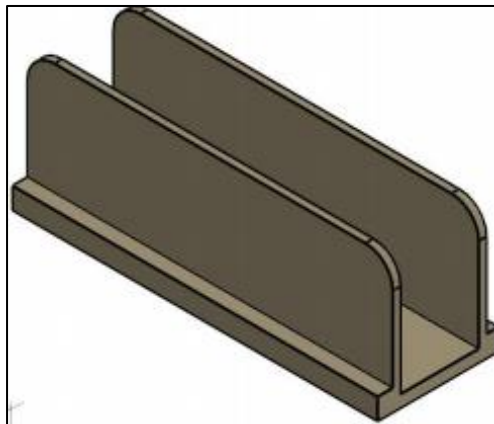
La rampa fue diseñada con el fin de lograr simular diferentes pendientes, y la sección de impacto fue diseñada con el fin de contener una estructura que simula la resistencia al deslizamiento. La última, está conformada por dos partes como se observa en la

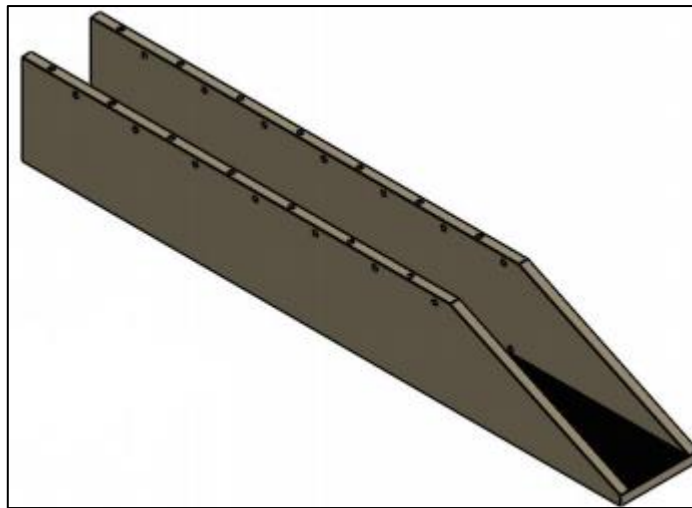
**Ilustración 3.1.3.1.3-** e **Ilustración 3.1.3.1-** donde la primera ilustración es la sección de impacto y la segunda hace el papel de conexión entre la rampa y la sección de impacto. Por otro lado, en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se aprecia el diseño de la rampa.

**Ilustración 3.1.3.1.3-2:** Sección de impacto.



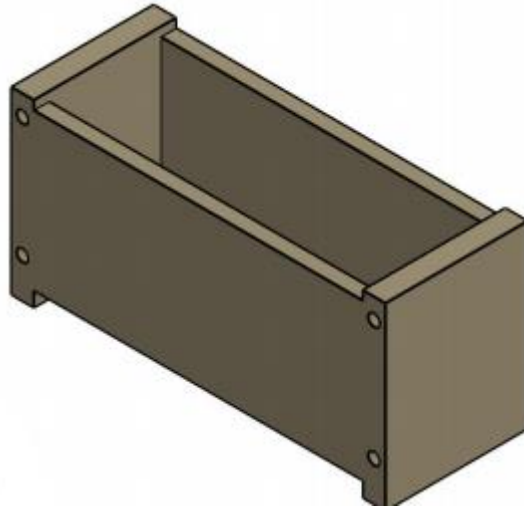
**Ilustración 3.1.3.1-3:** Elemento que realiza la conexión entre la rampa y la sección de impacto.



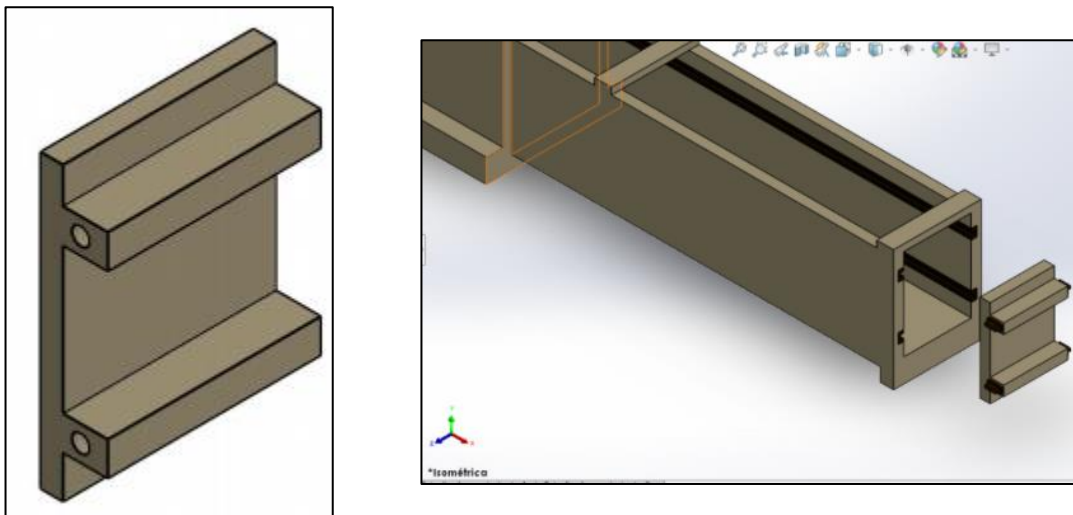
**Ilustración 3.1.3.1 4:** Rampa del modelo.

Adicionalmente, se realizó el diseño de dos elementos que simulan la estructura impactada. Donde el primero, es una estructura rectangular hueca la cual fue diseñada para la instalación de diferentes masas y para evaluar la resistencia al movimiento que estas generan. Siendo esta uno de los elementos que va a servir para simular la resistencia que posee una estructura real. Esta estructura se encuentra conectada en sus costados laterales a la sección de impacto por medio de pines que corren a través de rieles, como se puede observar en la [Ilustración 3.2.3.1-5](#). Por otro lado, se diseñó una tapa la cual va a poseer una masa menor a la estructura rectangular hueca, por lo tanto, esta proveerá menor resistencia al movimiento al recibir el impacto del material, con lo que se logra evaluar resistencias menores a la estructura rectangular hueca, ampliando así el rango de resistencias. Esta se puede apreciar en la [Ilustración 3.2.3.1-6](#)

**Ilustración 3.1.3.1 5:** Estructura rectangular hueca de impacto. Creación propia

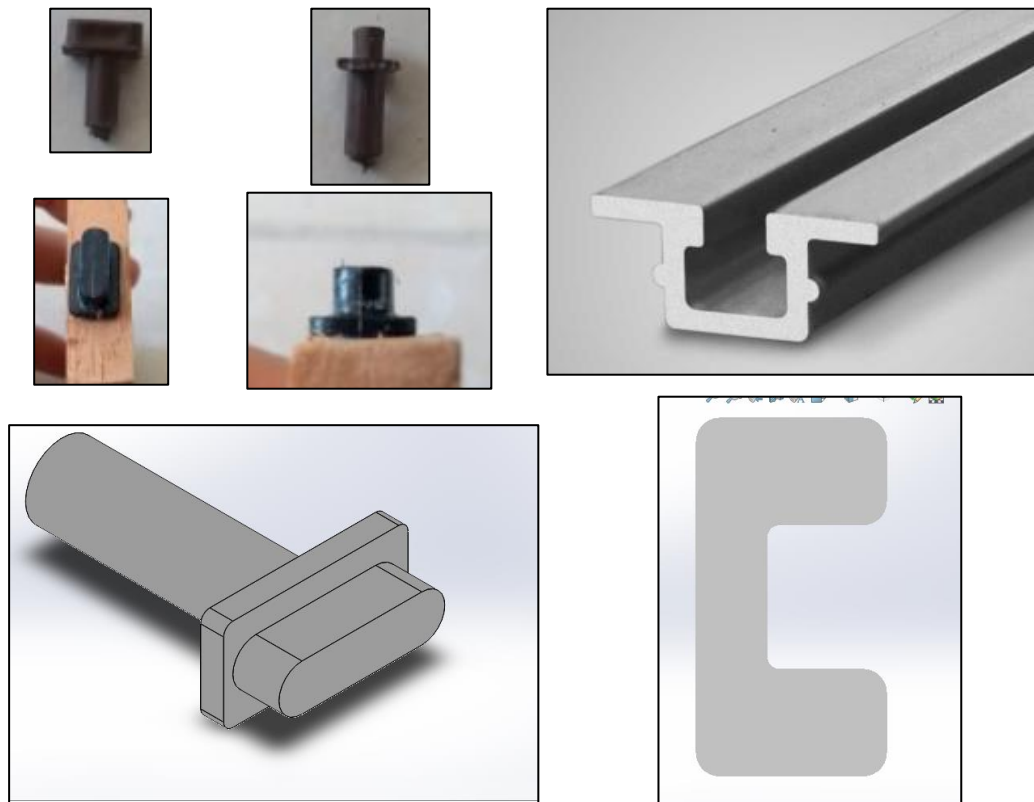


**Ilustración 3.1.3.1 6:** Tapa de impacto. Creación propia.



El sistema que se utilizó para que tanto la sección rectangular hueca y la tapa de impacto se movieran a través de la sección de impacto, se realizó por medio de rieles, siendo estos los carriles por los cuales se movilizan los pines que están conectados a las estructuras, como se observa en la [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.17](#). Los pines utilizados se lijaron para obtener la menor fracción posible entre estos y los rieles.

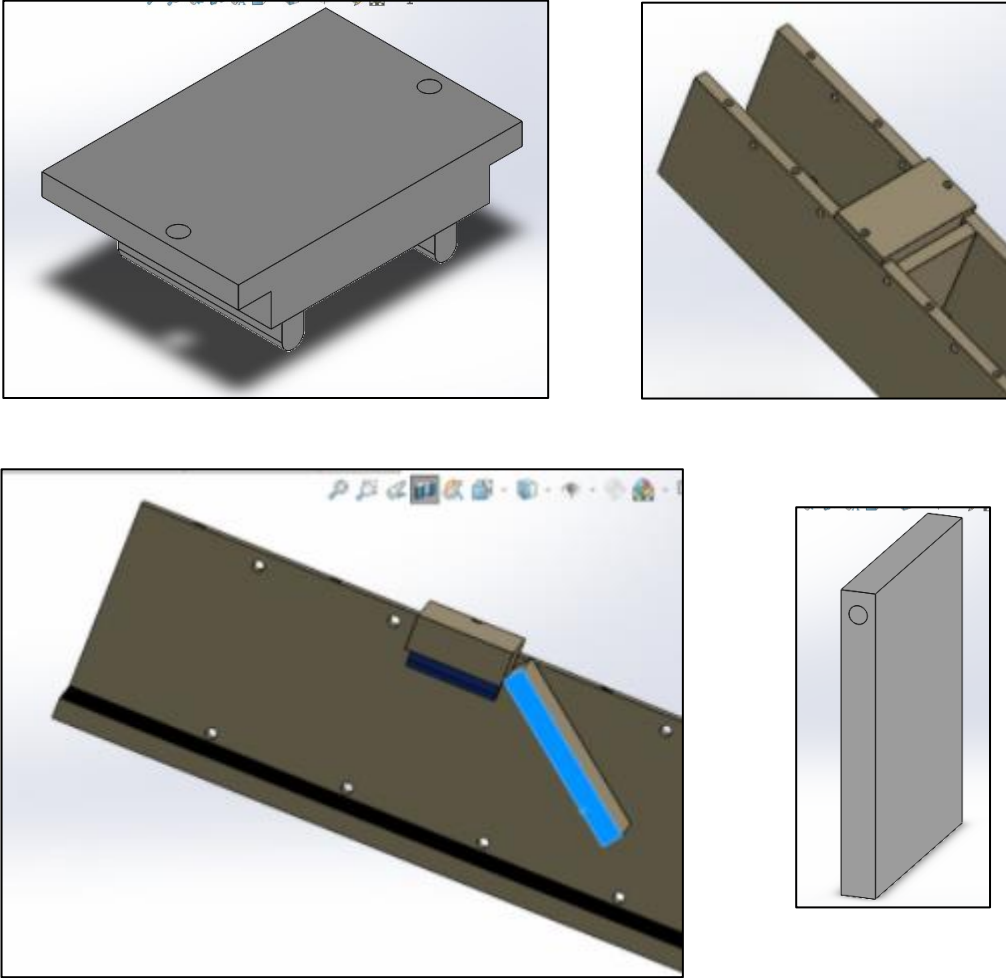
**Ilustración 3.1.3.1.1 7:** Sistema de deslizamiento de la tapa de impacto.



Tomado de: (Ducasse Industrial S.A. - Sistemas corredizos para la industria del mueble y la construcción n.d.; Madecentro n.d.)

Por último, se realizó el diseño de una compuerta, cuya función es contener y accionar la liberación del material para que deslice sobre la rampa. Esta puede ser instalada a diferentes abscisas del eje de la rampa para logra evaluar diferentes gradientes modificados, como se observa en la **Ilustración 3.1.3.1-8**.

**Ilustración 3.1.3.1- 8:** Compuerta de liberación del material. Creación propia.



Los planos de la estructura diseñada se encuentran adjuntos en los **Anexo: Plano sección de impacto**, hasta **Anexo: Ensamble número 5**

### 3.1.3.2 Materiales y construcción.

La construcción y ensamblaje del modelo se realizó a partir del diseño realizado en *Solid Works Students*. La conexión entre la rampa y la sección de conexión se realizó a través de una bisagra de doble sentido, logrando conjugar estos dos elementos en uno solo. Con el uso de la bisagra se inmoviliza la rampa horizontalmente, condicionando el movimiento al eje vertical. La sección de impacto se acopla entre la rampa y la sección de conexión. Los materiales utilizados en la construcción del modelo fueron diferentes tipos de madera. La tapa y la estructura rectangular



---

hueca de impacto fueron construidas de roble, mientras que para los otros componentes de madera se hizo uso de tableros de densidad media (MDF) con un espesor de quince milímetros.

Se hizo uso de diferentes materiales y elementos como: pines (los cuales hacen la conexión entre la tapa y la sección hueca de impacto con los rieles), rieles de puertas de armario de plástico color marrón, dos pistones que accionan la compuerta para que el material se deslice por la rampa, bisagra de doble sentido, y un metro el cual se instaló en la sección de impacto para lograr medir el desplazamiento de esta.

La construcción del modelo se realizó en un taller de carpintería con colaboración del carpintero José, quien proveyó la herramienta, experiencia, maquinaria de corte y diferentes elementos que se utilizaron, tales como: pegante, clavos para madera y pegatina que se instaló en la rampa para disminuir la fricción entre el material deslizante y la base de MDF. A continuación, se presentan diferentes ilustraciones de los elementos por separados y el ensamble final del modelo de laboratorio construido. Se presenta un compendio de ilustraciones partiendo de [Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) hasta **Ilustración 3.1.3.2-7** que muestra el producto final realizado en el taller de carpintería.

Por otra parte, se ingenió la forma de adicionar a estos elementos una superficie adhesiva, la cual se instaló en la cara que va a recibir el impacto con diferentes fines. El primero es retener las partículas que chocan sobre este, para lograr observar y medir la traza que dejó el deslizamiento, y realizar un análisis de acuerdo con los datos que se obtengan al realizar los experimentos. Segundo, esta superficie adhesiva se encuentra al ras con la base de la sección de impacto, favoreciendo que no se filtre material en los costados, y que el impacto se focalice en la estructura rectangular hueca y la tapa de impacto. Esta superficie adhesiva está compuesta por papel Contac transparente, al cual se le anexo cartulina Bristol negra en la cara no adhesiva por medio de silicona líquida, para así, en el momento de realizar el ensayo, retirar el papel que protege la parte adhesiva para lograr el cometido. Antes de añadir la superficie adhesiva, se recortó según el tamaño de la sección transversal interna de la sección de impacto, este elemento se añadió para la modelación de cada uno de los ensayos realizados.

**Ilustración 3.1.3.2-1:** Estructura rectangular hueca de impacto.



**Ilustración 3.1.3.2-2:** Tapa de impacto.



**Ilustración 3.1.3.2-3:** Rampa de deslizamiento del material.



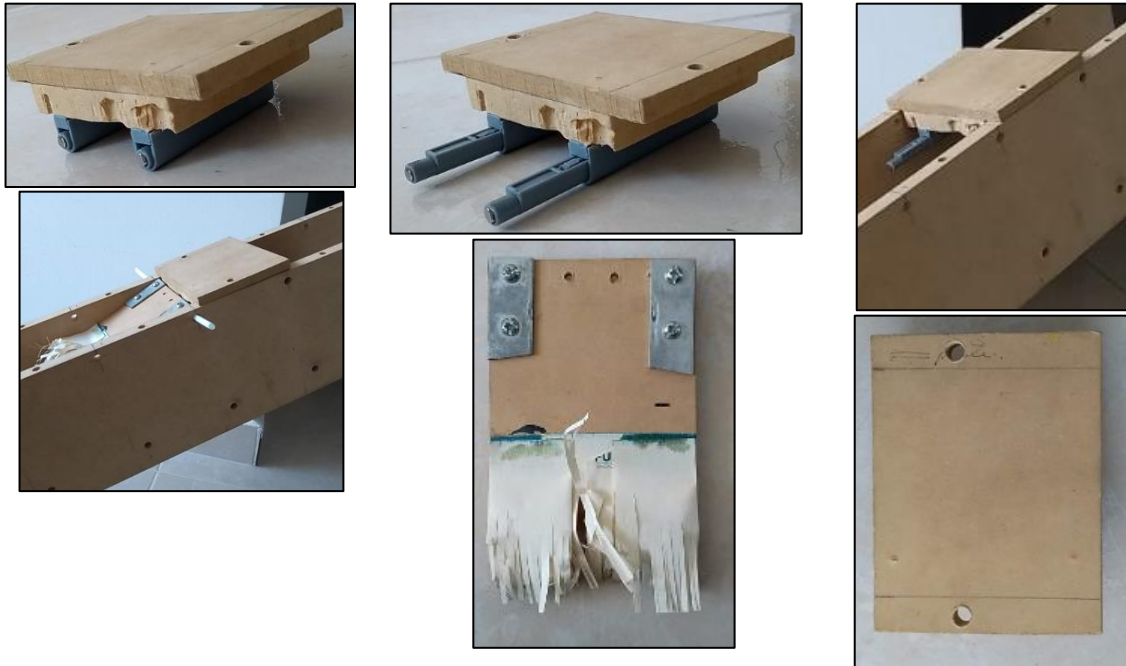
**Ilustración 3.1.3.2-4:** Sección de impacto.



**Ilustración 3.1.3.2-5:** Conexión entre sección de impacto y rampa.



**Ilustración 3.1.3.2-6:** Compuerta de deslizamiento.



**Ilustración 3.1.3.2-7:** Modelo experimental ensamblado.



### 3.2 Diseño de ensayos.

El diseño de los ensayos se realizó conforme a los datos geométricos de la base de datos de las investigaciones realizadas por Guimaraes-Silva (2015) y Kang and Kim (2016). En donde el gradiente modificado de la base de datos de Guimaraes-Silva (2015) se encuentre dentro del rango de  $[0,2, 1]$  y en el rango de pendiente de deslizamientos de Kang and Kim (2016) dentro del rango  $[0,1, 0,4]$ . En correspondencia a esto, se determina que los valores de gradiente modificado que se van evaluar en el modelo a escala de laboratorio para la realización de los ensayos tendrá un rango de  $[0,2, 1]$ . En los **Anexo: Banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Nova Friburgo, Brasil, en Enero del 2011 tomado de Guimaraes Silva (2015)** y **Anexo: Banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Corea del Sur entre Julio y Agosto del 2011. Tomado de (Kang and Kim 2016)** se presenta los datos correspondientes de la base de datos e los autores.

Para lograr el desarrollo de diferentes gradientes modificados fue necesario realizar diferentes relaciones entre las variables que lo comprenden cómo, abscisa en donde inicia el deslizamiento (H), la distancia real recorrida por el deslizamiento (L), distancia entre el centro de gravedad de la estructura y la cota menor del ensayo (Xi).

Se realizan ensayos preliminares evaluando los gradientes modificados máximos y mínimos que son posibles simular en el modelo construido, para verificar que se logre la simulación de los gradientes modificados dentro de los rangos de las bases de datos. Obteniendo que el gradiente modificado máximo que se logró evaluar en el modelo experimental es de 0,9 y el mínimo 0,42 siendo este último el gradiente modificado mínimo que genera un desplazamiento en la estructura hueca o en la tapa de impacto. Se realizaron un total de 12 combinaciones obteniendo diferentes gradientes modificados. Las diferentes composiciones que se lograron se tabulan en la **Tabla 3.2 1**, en donde se observan las diferentes relaciones que se realizaron entre los

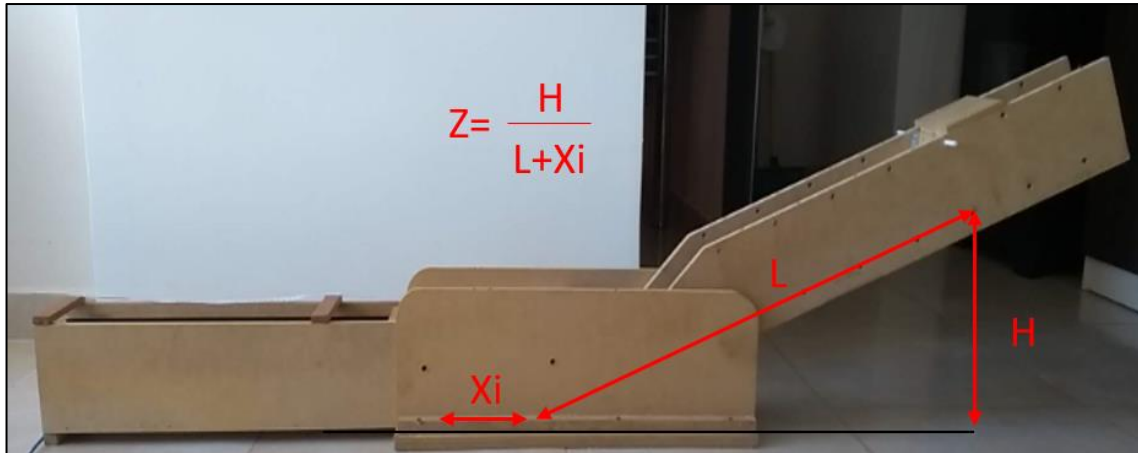
parámetros de intensidad para lograr obtener gradientes modificados dentro del rango [0,42 , 0,9]. Y la **Ilustración 3.2-1** presenta las variables en el modelo de laboratorio.

**Tabla 3.2-1:** Relaciones utilizadas para la obtención de diferentes gradientes modificados.

| Z [-] | L[cm] | H [cm] | Xi [cm] |
|-------|-------|--------|---------|
| 0,42  | 95    | 40     | 15      |
| 0,44  | 90    | 40     | 10      |
| 0,47  | 85    | 40     | 5       |
| 0,50  | 80    | 40     | 0       |
| 0,63  | 95    | 60     | 15      |
| 0,67  | 90    | 60     | 10      |
| 0,71  | 85    | 60     | 5       |
| 0,75  | 80    | 60     | 0       |
| 0,76  | 105   | 80     | 15      |
| 0,80  | 100   | 80     | 10      |
| 0,84  | 95    | 80     | 5       |
| 0,9   | 90    | 80     | 0       |



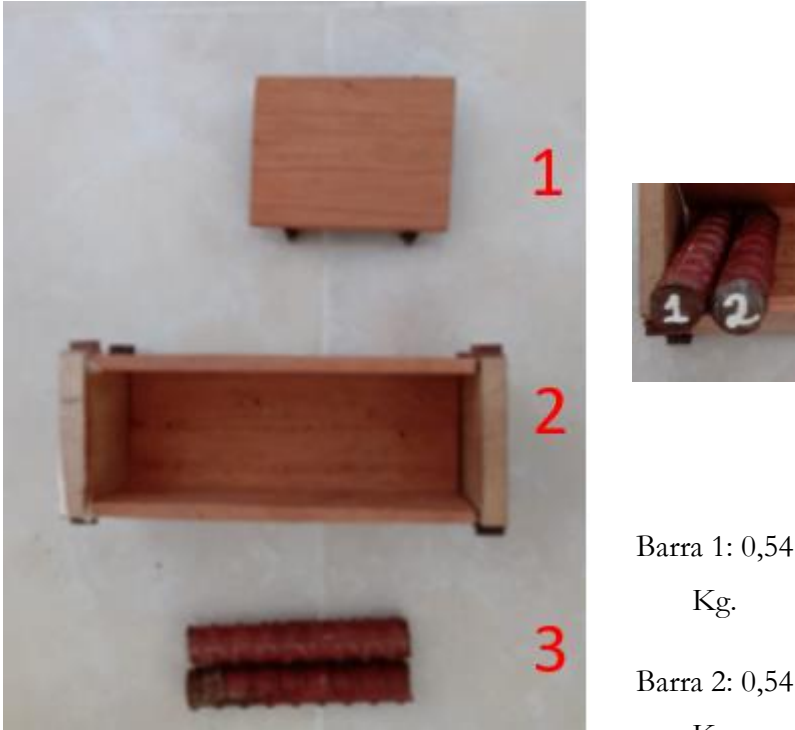
**Ilustración 3.2-1:** Variables en el modelo a escala de laboratorio para la ejecución de ensayos.



Con las diferentes combinaciones establecidas se inicia el proceso de ejecución de los ensayos. Para cada una de las combinaciones se establece un número de repeticiones buscando que la distorsión en la estimación del desplazamiento de la estructura de impacto se ajuste a una media. Así, minimizar el error para la obtención del desplazamiento del elemento. Se realizó un mínimo de tres repeticiones, buscando que el resultado de cada uno de los ensayos se encuentre dentro de una banda de confianza determinada a partir de la media. Así, los resultados encontrados por encima o por debajo de las bandas de confianza de cinco cm, fueron repetidos o rechazados. Cada simulación se realizó con una masa deslizante de 1640 gr de arena Ottawa, logrando simular que la masa deslizante tiene un volumen de 1000 cm<sup>3</sup>.

Una vez determinado el número de repeticiones para cada una de las combinaciones, se adiciona la variable de resistencia en el modelo de laboratorio. Donde la resistencia que simula el elemento impactado se controla a partir de la masa de este. Partiendo de una masa de 0,18 Kg hasta 1,56 Kg. Para así, lograr una completa evaluación de la vulnerabilidad de estructuras impactadas por deslizamientos de ladera. Las resistencias utilizadas se presentan en la **Tabla 3.2-2:** Combinaciones utilizadas para la obtención de diferentes gradientes modificados. Donde la segunda columna consigna las respectivas combinaciones para lograr mayor resistencia del elemento.

**Tabla 3.2-2:** Combinaciones utilizadas para la obtención de diferentes gradientes modificados

|  |                      | <b>Masa utilizada para la<br/>simulación de la<br/>resistencia de la<br/>estructura</b> |
|--|----------------------|---|
|  | <b>1</b>             | Tapa de impacto (TI)<br>0,18 gr.  |
|  | <b>2</b>             | Caja de impacto (CI)<br>0,48 gr.  |
|  | Barra 1: 0,54<br>Kg. | CI + Barra 1<br>1,02 gr.  |
|  | Barra 2: 0,54<br>Kg. | CI + Barra 1+ Barra 2<br>1,56 gr.   |

Donde: (1) Tapa de impacto TI, (2) caja de impacto CI y (3) barras de acero.

El procedimiento que se realizó para la ejecución de cada uno de los ensayos consistió en las siguientes siete instrucciones:

1. Medición de la masa del material deslizante. **Ilustración 3.2-2:** Medición de la masa deslizante. : Medición de la masa deslizante
2. Determinar la combinación de las variables (H, L y D) para el respectivo gradiente modificado con su respectiva resistencia. **Ilustración 3.1.3.2-3:** Tabulación de la combinación correspondiente del ensayo que se va a realizar: Tabulación de la combinación correspondiente al ensayo que se va a realizar.
3. Armado del dispositivo de acuerdo con las condiciones estipuladas del paso anterior.
4. Ejecución del deslizamiento.

5. Medición del movimiento que sufrió el elemento que interactuó con el deslizamiento. El cual fue llamado en el desarrollo de este trabajo como se presenta en la **Ilustración 3.1.3: Medición y tabulación del movimiento** que generó el deslizamiento en la estructura
6. Medición de la traza que dejó el deslizamiento en la parte frontal del elemento chocado. **Ilustración 3.1.3.2-5: Medición de la traza que dejó** el deslizamiento en la estructura
7. Repetición del ensayo, hasta lograr mínimo 2 ensayos que se encuentren dentro de la media de movimientos de los ensayos realizados.
8. Recopilación de datos. **Ilustración .**

La cronología del procedimiento se muestra a continuación por medio de ilustraciones, de acuerdo con las instrucciones anteriormente mencionadas. Las ilustraciones presentan el ensayo simulado de los parámetros Z:0.5 con L: 80 cm, H: 40 cm y Xi: 0 cm con resistencia SP (que corresponde a resistencia del cajón de impacto).

**Ilustración 3.2-2:** Medición de la masa deslizante.



**Ilustración 3.1.3.2-3:** Tabulación de la combinación correspondiente del ensayo que se va a realizar.

| Laboratorio de Gestión y pavimentos        |                               |
|--|-------------------------------|
| Fecha de Ensayo: 20/02/2020                | Materia: SP - Media - (16.90) |
| Realiza: Guillermo Heriberto Hamán Barrera |                               |
| Z(L): 0.5                                  |                               |
| Xi(cm): 0                                  |                               |
| R(Kg): 3P                                  |                               |
| Xi(cm):                                    |                               |

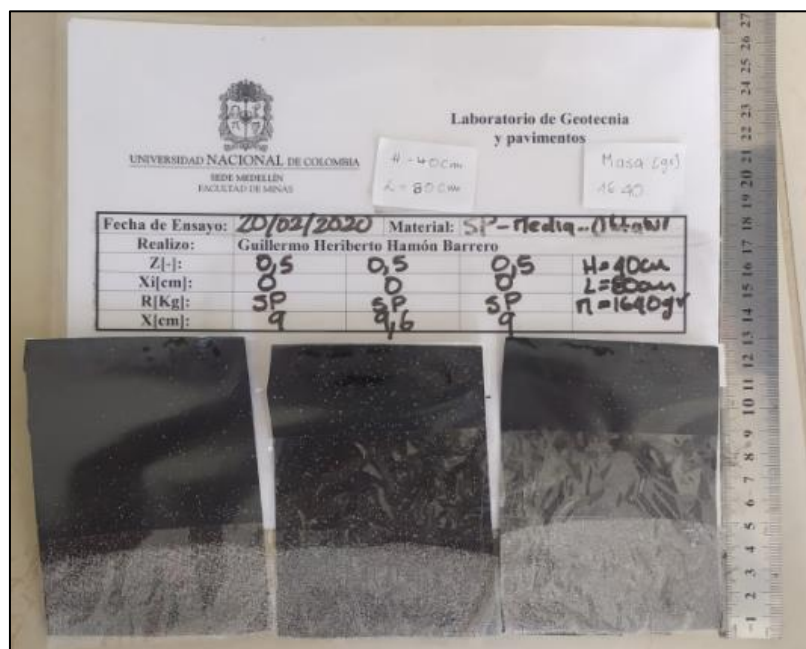
**Ilustración 3.1.3:** Medición y tabulación del movimiento que generó el deslizamiento en la estructura.



**Ilustración 3.1.3.2-5:** Medición de la traza que dejó el deslizamiento en la estructura



**Ilustración 3.1.3:** Resultado final para cada una de las combinaciones de gradiente modificado con su respectiva resistencia



---

### 3.3 Resultado de ensayos realizados en el modelo a escala de laboratorio.

De acuerdo con la información consignada en los subcapítulos anteriores, se realizaron un total de 147 experimentos. En donde se realizaron diferentes combinaciones entre los parámetros de intensidad (H, L, y Z) y parámetros de resistencia. Logrando obtener el valor en centímetros del desplazamiento que tuvo el elemento impactado. Para posteriormente ser evaluado y analizado en el siguiente capítulo.

En la **Tabla 3.3-1** se tabuló la caracterización de cada uno de los ensayos, iniciando por la identificación numérica de cada uno de ellos, la cota en donde inicia el deslizamiento **H**, teniendo como nivel de referencia la altura a la cual se encuentra la sección de impacto, la longitud de recorrido **L**, gradiente modificado **Z**, resistencia del elemento impactado **R**, distancia desde donde finaliza la pendiente hasta donde se encuentra la estructura impactada **X<sub>i</sub>**, distancia que varía en el rango [0, 5, 10, 15], valor desplazado de las repetición para cada uno de los ensayos, promedio del desplazamiento que tuvo el elemento **X<sub>totalProm</sub>**, distancia real que se desplazó el elemento impactado **X-X<sub>i</sub>** y el promedio del desplazamiento real.



Tabla 3.3-1: Resultados obtenidos en los ensayos realizados.

| ID <sub>Exp</sub> | H [cm] | L [cm] | Z [-] | R [Kg] | Xi [cm] | X [cm] | $\bar{X}$ [cm] | X-Xi [cm] | $\overline{X - Xi}$ [cm] |
|-------------------|--------|--------|-------|--------|---------|--------|----------------|-----------|--------------------------|
| 1                 |        |        |       |        |         | 13,8   |                | 13,8      |                          |
| 2                 | 40,0   | 80,0   | 0,500 | 0,110  | 0,0     | 12,5   | 13,10          | 12,5      | 13,10                    |
| 3                 |        |        |       |        |         | 13,0   |                | 13,0      |                          |
| 4                 |        |        |       |        |         | 10,3   |                | 5,3       |                          |
| 5                 | 40,0   | 85,0   | 0,471 | 0,110  | 5,0     | 6,0    | 8,60           | 1,0       | 4,90                     |
| 6                 |        |        |       |        |         | 9,5    |                | 4,5       |                          |
| 7                 |        |        |       |        |         | 10,5   |                | 0,5       |                          |
| 8                 | 40,0   | 90,0   | 0,444 | 0,110  | 10,0    | 10,6   | 10,57          | 0,6       | 0,57                     |
| 9                 |        |        |       |        |         | 10,6   |                | 0,6       |                          |
| 10                |        |        |       |        |         | 15,0   |                | 0,0       |                          |
| 11                | 40,0   | 95,0   | 0,421 | 0,110  | 15,0    | 15,0   | 15,00          | 0,0       | 0,00                     |
| 12                |        |        |       |        |         | 15,0   |                | 0,0       |                          |
| 13                |        |        |       |        |         | 44,0   |                | 44,0      |                          |
| 14                | 60,0   | 80,0   | 0,750 | 0,110  | 0,0     | 44,5   | 43,50          | 44,5      | 43,50                    |
| 15                |        |        |       |        |         | 42,0   |                | 42,0      |                          |
| 16                |        |        |       |        |         | 34,5   |                | 29,5      |                          |
| 17                | 60,0   | 85,0   | 0,706 | 0,110  | 5,0     | 38,0   | 37,50          | 33,0      | 34,00                    |
| 18                |        |        |       |        |         | 40,0   |                | 35,0      |                          |
| 19                |        |        |       |        |         | 38,4   |                | 28,4      |                          |
| 20                | 60,0   | 90,0   | 0,667 | 0,110  | 10,0    | 38,0   | 37,80          | 28,0      | 27,80                    |
| 21                |        |        |       |        |         | 37,0   |                | 27,0      |                          |
| 22                |        |        |       |        |         | 34,8   |                | 19,8      |                          |
| 23                | 60,0   | 95,0   | 0,632 | 0,110  | 15,0    | 34,3   | 34,55          | 19,3      | 19,55                    |
| 24                |        |        |       |        |         | 34,6   |                | 19,6      |                          |
| 25                |        |        |       |        |         | 62,5   |                | 62,5      |                          |
| 26                | 80,0   | 90,0   | 1,000 | 0,110  | 0,0     | 63,0   | 62,75          | 63,0      | 62,75                    |
| 27                |        |        |       |        |         | 62,8   |                | 62,8      |                          |
| 28                | 80,0   | 95,0   | 0,933 | 0,110  | 5,0     | 65,0   | 65,50          | 60,0      | 60,50                    |
| 29                |        |        |       |        |         | 66,0   |                | 61,0      |                          |

|    |      |       |       |       |      |  |  |      |       |
|----|------|-------|-------|-------|------|--|--|------|-------|
| 30 |      |       |       |       |      |  |  | 65,5 | 60,5  |
| 31 |      |       |       |       |      |  |  | 54,0 | 44,0  |
| 32 | 80,0 | 100,0 | 0,875 | 0,110 | 10,0 |  |  | 37,4 | 45,95 |
| 33 |      |       |       |       |      |  |  | 37,4 | 44,25 |
| 34 |      |       |       |       |      |  |  | 54,5 | 44,5  |
| 35 | 80,0 | 105,0 | 0,824 | 0,110 | 15,0 |  |  | 26,0 | 11,0  |
| 36 |      |       |       |       |      |  |  | 40,5 | 25,5  |
| 37 |      |       |       |       |      |  |  | 9,0  | 9,0   |
| 38 | 40,0 | 80,0  | 0,500 | 0,445 | 0,0  |  |  | 9,6  | 9,20  |
| 39 |      |       |       |       |      |  |  | 9,20 | 9,6   |
| 40 |      |       |       |       |      |  |  | 9,0  | 9,0   |
| 41 | 40,0 | 85,0  | 0,471 | 0,445 | 5,0  |  |  | 5,5  | 0,5   |
| 42 |      |       |       |       |      |  |  | 6,0  | 5,73  |
| 43 |      |       |       |       |      |  |  | 5,73 | 1,0   |
| 44 | 40,0 | 90,0  | 0,444 | 0,445 | 10,0 |  |  | 1,0  | 0,73  |
| 45 |      |       |       |       |      |  |  | 0,7  | 0,7   |
| 46 |      |       |       |       |      |  |  | 10,0 | 0,0   |
| 47 | 40,0 | 95,0  | 0,421 | 0,445 | 15,0 |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 48 |      |       |       |       |      |  |  | 10,0 | 10,00 |
| 49 |      |       |       |       |      |  |  | 0,0  | 0,0   |
| 50 | 60,0 | 80,0  | 0,750 | 0,445 | 0,0  |  |  | 15,0 | 15,00 |
| 51 |      |       |       |       |      |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 52 |      |       |       |       |      |  |  | 15,0 | 15,00 |
| 53 | 60,0 | 85,0  | 0,706 | 0,445 | 5,0  |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 54 |      |       |       |       |      |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 55 |      |       |       |       |      |  |  | 15,0 | 15,00 |
| 56 | 60,0 | 90,0  | 0,667 | 0,445 | 10,0 |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 57 |      |       |       |       |      |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 58 |      |       |       |       |      |  |  | 15,0 | 15,00 |
| 59 | 60,0 | 95,0  | 0,632 | 0,445 | 15,0 |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 60 |      |       |       |       |      |  |  | 0,0  | 0,00  |
| 61 | 80,0 | 90,0  | 1,000 | 0,445 | 0,0  |  |  | 15,0 | 15,00 |
| 62 |      |       |       |       |      |  |  | 0,0  | 0,00  |

|    |      |       |       |       |      |      |       |      |       |  |
|----|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|--|
| 63 |      |       |       |       |      | 45,1 |       | 45,1 |       |  |
| 64 |      |       |       |       |      | 35,6 |       | 30,6 |       |  |
| 65 | 80,0 | 95,0  | 0,933 | 0,445 | 5,0  | 40,5 | 39,70 | 35,5 | 36,75 |  |
| 66 |      |       |       |       |      | 43,0 |       | 38,0 |       |  |
| 67 |      |       |       |       |      | 24,8 |       | 14,8 |       |  |
| 68 | 80,0 | 100,0 | 0,875 | 0,445 | 10,0 | 40,0 | 34,47 | 30,0 | 29,30 |  |
| 69 |      |       |       |       |      | 38,6 |       | 28,6 |       |  |
| 70 |      |       |       |       |      | 28,7 |       | 13,7 |       |  |
| 71 | 80,0 | 105,0 | 0,824 | 0,445 | 15,0 | 38,6 | 35,20 | 23,6 | 23,45 |  |
| 72 |      |       |       |       |      | 38,3 |       | 23,3 |       |  |
| 73 |      |       |       |       |      | 0,5  |       | 0,5  |       |  |
| 74 | 40,0 | 80,0  | 0,500 | 1,010 | 0,0  | 0,6  | 0,55  | 0,6  | 0,55  |  |
| 75 |      |       |       |       |      | 0,6  |       | 0,6  |       |  |
| 76 |      |       |       |       |      | 5,0  |       | 0,0  |       |  |
| 77 | 40,0 | 85,0  | 0,471 | 1,010 | 5,0  | 5,0  | 5,00  | 0,0  | 0,00  |  |
| 78 |      |       |       |       |      | 5,0  |       | 0,0  |       |  |
| 79 |      |       |       |       |      | 10,0 |       | 0,0  |       |  |
| 80 | 40,0 | 90,0  | 0,444 | 1,010 | 10,0 | 10,0 | 10,00 | 0,0  | 0,00  |  |
| 81 |      |       |       |       |      | 10,0 |       | 0,0  |       |  |
| 82 |      |       |       |       |      | 15,0 |       | 0,0  |       |  |
| 83 | 40,0 | 95,0  | 0,421 | 1,010 | 15,0 | 15,0 | 15,00 | 0,0  | 0,00  |  |
| 84 |      |       |       |       |      | 15,0 |       | 0,0  |       |  |
| 85 |      |       |       |       |      | 24,7 |       | 24,7 |       |  |
| 86 | 60,0 | 80,0  | 0,750 | 1,010 | 0,0  | 30,0 | 27,43 | 30,0 | 28,80 |  |
| 87 |      |       |       |       |      | 27,6 |       | 27,6 |       |  |
| 88 |      |       |       |       |      | 25,7 |       | 20,7 |       |  |
| 89 | 60,0 | 85,0  | 0,706 | 1,010 | 5,0  | 23,2 | 23,73 | 18,2 | 18,73 |  |
| 90 |      |       |       |       |      | 22,3 |       | 17,3 |       |  |
| 91 |      |       |       |       |      | 17,3 |       | 7,3  |       |  |
| 92 | 60,0 | 90,0  | 0,667 | 1,010 | 10,0 | 19,3 | 18,27 | 9,3  | 8,27  |  |
| 93 |      |       |       |       |      | 18,2 |       | 8,2  |       |  |
| 94 |      |       |       |       |      | 17,6 |       | 2,6  |       |  |
| 95 | 60,0 | 95,0  | 0,632 | 1,010 | 15,0 | 16,2 | 17,03 | 1,2  | 2,03  |  |
| 96 |      |       |       |       |      | 17,3 |       | 2,3  |       |  |
| 97 | 80,0 | 90,0  | 1,000 | 1,010 | 0,0  | 52,0 | 43,53 | 42,0 | 42,60 |  |

|     |      |       |       |       |      |      |       |      |       |      |
|-----|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|
| 98  |      |       |       |       |      |      |       | 43,2 |       | 43,2 |
| 99  |      |       |       |       |      |      |       | 35,4 |       | 35,4 |
| 100 |      |       |       |       |      |      |       | 30,4 |       | 25,4 |
| 101 | 80,0 | 95,0  | 0,933 | 1,010 | 5,0  | 27,5 | 30,97 | 22,5 | 23,95 |      |
| 102 |      |       |       |       |      | 35,0 |       | 30,0 |       |      |
| 103 |      |       |       |       |      | 30,3 |       | 20,3 |       |      |
| 104 | 80,0 | 100,0 | 0,875 | 1,010 | 10,0 | 28,5 | 29,33 | 18,5 | 19,33 |      |
| 105 |      |       |       |       |      | 29,2 |       | 19,2 |       |      |
| 106 |      |       |       |       |      | 23,5 |       | 8,5  |       |      |
| 107 | 80,0 | 105,0 | 0,824 | 1,010 | 15,0 | 26,2 | 25,03 | 11,2 | 10,03 |      |
| 108 |      |       |       |       |      | 25,4 |       | 10,4 |       |      |
| 109 |      |       |       |       |      | 0,5  |       | 0,5  |       |      |
| 110 | 40,0 | 80,0  | 0,500 | 1,575 | 0,0  | 1,0  | 0,77  | 1,0  | 0,77  |      |
| 111 |      |       |       |       |      | 0,8  |       | 0,8  |       |      |
| 112 |      |       |       |       |      | 0,0  |       | 0,0  |       |      |
| 113 | 40,0 | 85,0  | 0,471 | 1,575 | 5,0  | 0,0  | 0,00  | 0,0  | 0,00  |      |
| 114 |      |       |       |       |      | 0,0  |       | 0,0  |       |      |
| 115 |      |       |       |       |      | 0,0  |       | 0,0  |       |      |
| 116 | 40,0 | 90,0  | 0,444 | 1,575 | 10,0 | 0,0  | 0,00  | 0,0  | 0,00  |      |
| 117 |      |       |       |       |      | 0,0  |       | 0,0  |       |      |
| 118 |      |       |       |       |      | 0,0  |       | 0,0  |       |      |
| 119 | 40,0 | 95,0  | 0,421 | 1,575 | 15,0 | 0,0  | 0,00  | 0,0  | 0,00  |      |
| 120 |      |       |       |       |      | 0,0  |       | 0,0  |       |      |
| 121 |      |       |       |       |      | 20,4 |       | 20,4 |       |      |
| 122 | 60,0 | 80,0  | 0,750 | 1,575 | 0,0  | 19,2 | 19,63 | 19,2 | 19,63 |      |
| 123 |      |       |       |       |      | 19,3 |       | 19,3 |       |      |
| 124 |      |       |       |       |      | 15,5 |       | 10,5 |       |      |
| 125 | 60,0 | 85,0  | 0,706 | 1,575 | 5,0  | 15,4 | 15,45 | 10,4 | 10,45 |      |
| 126 |      |       |       |       |      | 15,5 |       | 10,5 |       |      |
| 127 |      |       |       |       |      | 11,5 |       | 1,5  |       |      |
| 128 | 60,0 | 90,0  | 0,667 | 1,575 | 10,0 | 13,2 | 12,23 | 3,2  | 2,23  |      |
| 129 |      |       |       |       |      | 12,0 |       | 2,0  |       |      |
| 130 |      |       |       |       |      | 15,3 |       | 0,3  |       |      |
| 131 | 60,0 | 95,0  | 0,632 | 1,575 | 15,0 | 15,3 | 15,30 | 0,3  | 0,30  |      |
| 132 |      |       |       |       |      | 15,3 |       | 0,3  |       |      |



|     |      |       |       |       |      |      |       |      |       |
|-----|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|
| 133 |      |       |       |       |      | 32,0 |       | 32,0 |       |
| 134 | 80,0 | 90,0  | 1,000 | 1,575 | 0,0  | 29,0 | 32,00 | 29,0 | 30,50 |
| 135 |      |       |       |       |      | 35,0 |       | 35,0 |       |
| 136 |      |       |       |       |      | 17,5 |       | 12,5 |       |
| 137 | 80,0 | 95,0  | 0,933 | 1,575 | 5,0  | 19,0 | 20,23 | 14,0 | 13,25 |
| 138 |      |       |       |       |      | 24,2 |       | 19,2 |       |
| 139 |      |       |       |       |      | 17,5 |       | 7,5  |       |
| 140 | 80,0 | 100,0 | 0,875 | 1,575 | 10,0 | 18,8 | 18,10 | 8,8  | 8,10  |
| 141 |      |       |       |       |      | 18,0 |       | 8,0  |       |
| 142 |      |       |       |       |      | 19,2 |       | 4,2  |       |
| 143 | 80,0 | 105,0 | 0,824 | 1,575 | 15,0 | 19,2 | 19,13 | 4,2  | 4,13  |
| 144 |      |       |       |       |      | 19,0 |       | 4,0  |       |

En la tabla anterior, se encuentran diferentes valores resaltados de color rojo, esos valores se refieren a ensayos realizados cuyo resultado se encuentra fuera de las bandas de confianza y posee una distorsión superior a cinco centímetros por lo que no se va a hacer uso de estos para el cálculo de la distancia promedio del desplazamiento.

### 3.4 Descripción de la calibración de la ecuación de ajuste para el modelo a escala y sistema de normalización de los datos de laboratorio

Se parte de la normalización del desplazamiento que tuvo la estructura de impacto. Esta normalización consistió en obtener una curva de ajuste a los datos conforme a los parámetros ejecutados en el ensayo. A partir de la curva de ajuste y su respectiva función se calcula el valor máximo de desplazamiento que puede lograr. Siendo este el valor con el cual se parametrizan los valores de desplazamiento del elemento.

La calibración del dispositivo construido a escala partió de la base teórica utilizada por Guimaraes-Silva (2015), la cual consiste en el uso del Principio de Proporcionalidad Natural realizado por (Juárez-Badillo 2010). Fundamentándose en que la naturaleza tiene la cualidad de

un orden el cual puede ser descrito por medio de ecuaciones matemáticas. Donde, estas ecuaciones están compuesta por variables de un sistema, fenómeno natural, calculo ingenieril las cuales deben ser determinadas para describir el fenómeno. Una vez determinadas las variables, se obtiene una ecuación de calibración del modelo donde la vulnerabilidad está en función del gradiente modificado y la resistencia del elemento que recibe el impacto del deslizamiento. Esta ecuación posee dos variables características las cuales se calibran a partir de los ensayos realizados en el prototipo.

La primera variable característica es la relación que tiene el gradiente modificado y la resistencia del elemento. Donde la calibración de este parte de una variable de control conocida, la cual es el valor de vulnerabilidad de 0,5 siendo este un valor premeditado, ya que este valor contiene el valor medio de afectación que puede tener una estructura al ser impactada por deslizamiento, así lograr que la variable característica represente de mejor manera las situaciones que se presentan en campo.

Análogamente, la segunda variable característica es el parámetro no adimensional de proporcionalidad el cual es función de la resistencia del elemento. Donde la resistencia tiende a aumentar o disminuir en función de la distancia a la cual se encuentra el elemento de la cota inferior del deslizamiento. La calibración de este, parte de subdividir los ensayos dentro del rango de  $X_i$ , debido a que se encuentra una agrupación de los valores obtenidos de vulnerabilidad. Obteniendo un rango de esta variable característica que se ajusta a los datos obtenidos en laboratorio.

Finalmente, en función de los valores obtenidos de las variables características se realiza una calibración global de estos por medio de mínimos cuadrados, para obtener un valor de cada uno que conjugado representen y se ajusten a los datos obtenidos en el prototipo a escala.

## 4 Calibración del modelo a escala de laboratorio

Este capítulo presenta detalladamente el procedimiento empleado para la calibración del modelo a escala, su respectiva ecuación para la creación de curva de vulnerabilidad de edificaciones en función de los parámetros de intensidad de la amenaza.

### 4.1 Base teórica

Inicialmente Guimaraes-Silva (2015) a partir de un análisis físico-matemático por medio de la ecuación 4.1-3 describe la vulnerabilidad como función de la intensidad del deslizamiento ( $Z$  gradiente modificado) y la resistencia, expresadas en términos adimensionales. la cual fue recalibrada de acuerdo con la información obtenida en el levantamiento de los deslizamientos ocurridos en el municipio de Nova Friburgo para consolidar la vulnerabilidad dentro del rango  $[0, 1]$ , ya que inicialmente consideró únicamente las estructuras con vulnerabilidad distinta de uno.

$$V = \left[ 1 + \left( \frac{Z}{R} \right)^{-1/0,04} \right]^{-0,05} \quad (\text{Eq: 4.1})$$

De acuerdo a Guimaraes-Silva (2015) un deslizamiento tiene variables que logran describir la vulnerabilidad física de forma más simple. Siendo estas, la relación entre gradiente modificado (intensidad) y la resistencia de las estructuras ( $R$ ), denominado  $T$  por medio del “Principio de Proporcionalidad Natural” propuesto por Juárez-Badillo (2010).

El universo posee la cualidad de ser ordenado de una forma simple, por medio de ecuaciones matemáticas muy simples (Juárez-Badillo 2010). Haciendo uso del principio de proporcionalidad natural, que indica que las variables apropiadas son las que describan el fenómeno de la forma más simple posible.

El principio de proporcionalidad natural indica que los fenómenos físicos se logran describir por medio de las variables “apropiadas” X y Y. Donde, Y es función de x,  $Y=(X)$  y dejando los valores extremos apropiados de Y como,  $Y_0 = Y(0)$  y  $Y_\infty = Y(\infty)$ . Así, la variable X tiene un dominio real desde 0 hasta  $\infty$ , Mientras que el dominio real de la variable Y no está completo. Por lo tanto, se hace uso de una variable más Z, como función apropiada de Y con dominio real completo,  $Z(Y_0) = 0$  y  $Z(Y_\infty) = \infty$ . Logrando una función simple que satisfacen las condiciones iniciales de los extremos de Y. Una vez establecidas las variables apropiadas, debe formularse y cumplirse los dos principios básicos complementarios, los cuales indican:

1. La ecuación que relaciona Y y X solo puede existir a través de parámetros no adimensionales y debe satisfacer las condiciones de frontera,  $Y_0 = Y(0)$  y  $Y_\infty = Y(\infty)$ , independiente de los puntos críticos.
2. La relación entre Y y X puede existir solamente a través de la correspondiente función apropiada Z y además, no debe poseer una proporcionalidad lineal.

Así mismo, la relación entre la variable X y Y debe estar dada por:

$$\frac{dZ}{Z} a \frac{dX}{X} \quad (\text{Eq: 4.1-1})$$

Siendo  $a$  un parámetro no dimensional de proporcionalidad. Donde, la ecuación 4.1-1 se define como una “proporcionalidad no lineal apropiada” entre Y y X a través de la función apropiada,  $Z=Z(Y)$ , simplemente dada por la [Eq 4.2-2](#)

$$Z = \frac{1}{Y-Y_\infty} - \frac{1}{Y_0-Y_\infty} \quad (\text{Eq 4.1-2})$$

Asumiendo que  $Y_\infty < Y_0$ , en el caso contrario donde  $Y_\infty > Y_0$ ,  $Z(Y_0) = 0$  y  $Z(Y_\infty) = \infty$ . En general el uso del principio de proporcionalidad natural, como antes fue mencionado, es usado para describir por medio de una ecuación general muy simple, problemas de ingeniería geotécnica.

Considerando la vulnerabilidad física de una estructura función de la relación T (gradiente modificado y la resistencia de la estructura). Evaluando la vulnerabilidad física a partir de  $T=0$ ,

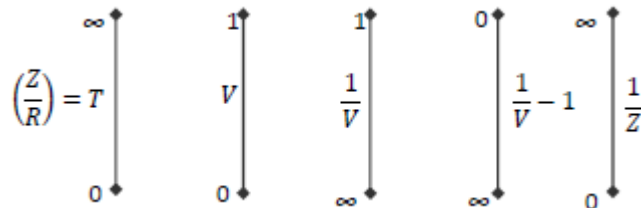
la vulnerabilidad va a incrementar desde  $V=0$  en  $T=0$  hasta  $V=V(T)$  en  $T= \infty$ . Siendo  $V$  y  $T$  las variables más simples para describir el fenómeno. Por lo que el fenómeno físico se puede describir apropiadamente por medio de las variables  $V$  y  $T$ . Dejando como los valores extremos apropiados de  $V$  sean,  $V_0 = V(0)$  y  $V_\infty = V(\infty)$ . Se obtiene que la variable  $T$  tiene un dominio real desde 0 hasta  $\infty$ .

La relación entre  $V$  y  $T$ , de acuerdo con el principio de proporcionalidad natural, deberá ser a través de su apropiada función, es aquí en donde se simplifica la función entre estas con un completo dominio, cuya función varía entre 0 y  $\infty$ . Remitiéndonos a la ecuación Eq (4.1 1), siendo esta la proporcionalidad no lineal entre las variables apropiadas que describen el fenómeno a través de la función apropiada de  $Z=Z(V)$  dada por la Eq (4.1-2). La función más sencilla de  $V$  y  $T$  con completo dominio es la Eq 4.1-3.

$$Z = \frac{1}{V} - \frac{1}{V_T} \tag{Eq 4.1-3}$$

Así, cuando  $T$  varía entre 0 y  $\infty$ ,  $Z$  varía entre  $\infty$  y 0. La ilustración 4.1-1 muestra la relación entre las variables apropiadas y su apropiada función.

**Ilustración 4-1.** Diagrama esquemático para la función apropiada de  $V=f(T)$ . Tomado de Guimaraes-Silva (2015).



Tomado de MartínezCarvajal et al. (2018)

El Principio de Proporcionalidad Natural declara que la relación entre la variable debe ser dada por medio de la Eq 4.1-1 la cual se reescribe en la Eq 4.1-4.

$$\frac{dZ}{Z} = \delta \frac{dT}{T} \quad (\text{Eq 4.1-3})$$

De acuerdo con la ilustración 4.1-1, cuando T varía de 0 a  $\infty$ ,  $1/(Z)$  también varía de 0 a  $\infty$  de esta forma la Eq 4.1-5, debe ser rescrita de la siguiente forma

$$\frac{d\frac{1}{Z}}{\frac{1}{Z}} = \delta \frac{dT}{T} \quad (\text{Eq 4.1-4})$$

$$-\frac{dZ}{Z} = \delta \frac{dT}{T} \quad (\text{Eq 4.1-5})$$

Resolviendo la Eq (4.1-6), integrando a ambos lados se obtiene que

$$\int_{Z_1}^Z \frac{1}{Z} dZ = -\delta \int_{T_1}^T \frac{1}{T} dT \quad (\text{Eq 4.1-6})$$

$$\ln \int_{Z_1}^Z Z = \ln \int_{T_1}^T (T)^{-\delta} dT \quad (\text{Eq 4.1-7})$$

$$\ln \frac{Z}{Z_1} = \ln \left( \frac{T}{T_1} \right)^{-\delta} \quad (\text{Eq 4.1-8})$$

Introduciendo el valor de z de la Eq (4.1-4) en la Eq (4.1-9)

$$\frac{\frac{1}{V} - \frac{1}{V_T}}{\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_T}} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} \quad (\text{Eq 4.1-9})$$

Donde la Eq (4.1-10) puede ser rescrita como

$$\frac{\frac{V_T}{V} - 1}{\frac{V_T}{V_1} - 1} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} \quad (\text{Eq 4.1-10})$$

Resolviendo la Eq (4.1-11) se obtiene

$$V = \frac{V_T}{1 + \left(\frac{V_T}{V_1} - 1\right) \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta}} \quad (\text{Eq 4.1-11})$$

Si tomamos como punto conocido el punto donde  $V_1 = \frac{V_T}{2}$  en  $T_1 = T^*$ , donde  $T^*$  es llamado  $T$  característico de la relación entre el gradiente y la resistencia de la estructura. Se obtiene la expresión de la Eq (4.1-14)

$$\frac{V}{V_T} = \frac{1}{\left(\frac{T}{T^*}\right)^{-\delta} + 1} \quad (\text{Eq 4.1-12})$$

$$\frac{V}{V_T} = \left[ \left(\frac{T}{T^*}\right)^{-\delta} + 1 \right]^{-1} \quad (\text{Eq 4.1-13})$$

Finalmente, se obtiene una ecuación matemática capaz de cuantificar la vulnerabilidad física de elementos estructurales expuestos a deslizamientos de ladera. Teniendo en cuenta la relación entre las variables involucradas en el fenómeno natural. Eq 4.1-14

La construcción de curvas de vulnerabilidad física para estructura impactadas por deslizamientos de ladera a partir del prototipo a escala de laboratorio se hace evaluando la Eq (6.1-15). Sin embargo, es necesario la calibración de los valores característicos de  $T^*$  y  $\delta$ . Para obtener una ecuación matemática que describa la vulnerabilidad física en el modelo a escala.

## **4.2 Calibración de la variable característica $T^*$ y parámetro no dimensional de proporcionalidad $\delta$ .**

Este capítulo presenta el procedimiento realizado para la calibración de las dos variables, para obtener la ecuación que represente de forma más simple el fenómeno de la interacción que tiene el deslizamiento de ladera con la estructura en el modelo a escala. Partiendo de calibraciones preliminares de dichas variables por separado, para finalmente realizar una calibración global que se ajuste a los datos de laboratorio.

### **4.2.1 Calibración de la variable característica $T^*$ .**

La calibración de la variable característica  $T^*$  inicia por medio de la variable de control  $V_1$ , la cual es el valor medio de  $V$ . Se sabe que el rango de  $V$  está definido de  $[0, 1]$ , por lo tanto, la variable de control es  $V_1 = 0,5$ . El valor  $V_1$  no es arbitrario ya que, según el principio de proporcionalidad natural, cuando la variable dependiente es 0.5 la variable independiente debe ser precisamente  $T^*$  que es el llamado valor característico por definiciones.



Una vez conocido el valor de la variable de control, se procede a la determinación del parámetro característico  $T^*$ , para así obtener una ecuación en la que la vulnerabilidad sea directamente proporcional a  $T$ .

El procedimiento que se presentara a continuación presenta la ejecución de la calibración del valor característico  $T^*$  para el modelo a escala.

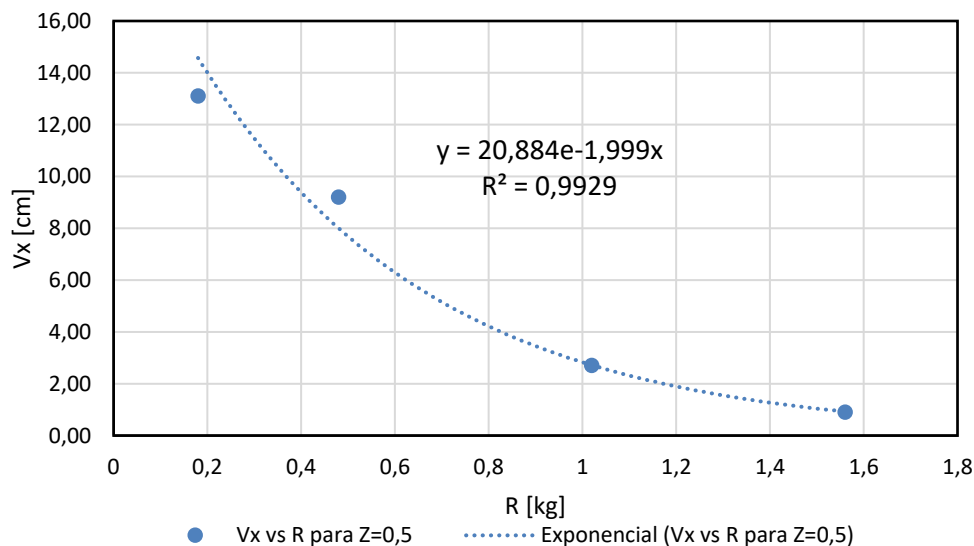
- I. Se realiza el grafico de  $V_x$  vs  $R$ . para cada uno de los gradientes modificados modelados en el dispositivo a escala. Donde  $V_x$  es el valor en centímetros que se movió la estructura de impacto y  $R$  el valor de resistencia de esta. Se presenta la ejemplificación del cálculo para el gradiente modificado  $Z=0,5$ . La grafica se realizó a partir de los datos tabulados en la **Tabla 4.2.1-1**: Datos obtenidos en el ensayo para gradiente modificado  $Z=0,5$ .. Y su respectivo grafico se ve en **¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar 0 al texto que desea que aparezca aquí.**

**Tabla 4.2.1-1:** Datos obtenidos en el ensayo para gradiente modificado  $Z=0,5$ .

| ID<br>Experimento | Z<br>[-] | $X_i$<br>[cm] | L<br>[cm] | H<br>[cm] | R<br>[Kg] | $V_x$<br>[cm] | $V_{x-x_i}$ [cm] | $V(v_{x-x_i})$<br>Prom[cm] |
|-------------------|----------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|------------------|----------------------------|
| 1                 |          |               |           |           |           | 13,8          | 13,8             |                            |
| 2                 | 0,5      | 0             | 80        | 40        | 0,18      | 12,5          | 12,5             | 13,10                      |
| 3                 |          |               |           |           |           | 13            | 13               |                            |
| 37                |          |               |           |           |           | 9             | 9                |                            |
| 38                | 0,5      | 0             | 80        | 40        | 0,48      | 9,6           | 9,6              | 9,20                       |
| 39                |          |               |           |           |           | 9             | 9                |                            |
| 73                |          |               |           |           |           | 2,5           | 2,5              |                            |
| 74                | 0,5      | 0             | 80        | 40        | 1,015     | 2,9           | 2,9              | 2,70                       |
| 75                |          |               |           |           |           | 2,7           | 2,7              |                            |
| 109               |          |               |           |           |           | 0,5           | 0,5              |                            |
| 110               | 0,5      | 0             | 80        | 40        | 1,55      | 1             | 1                | 0,90                       |
| 111               |          |               |           |           |           | 0,8           | 0,8              |                            |

- II. Se determina la función de ajuste para los datos  $V_x$  vs  $R$ , la cual debe cumplir la condición de que su coeficiente de determinación debe ser el que más se aproxime a uno. La función exponencial es la que mejor se ajusta a los datos para cada uno de los gradientes evaluados en el modelo a escala. Adicionalmente, la función exponencial posee la característica de ser asintótica en el eje de las ordenadas y el eje de las abscisas, siendo la que mejor ejemplifica el fenómeno ocurrido, ya que a mayor resistencia menor valor de vulnerabilidad y a media que el valor de la resistencia se acerca a cero el valor de la vulnerabilidad aumenta, siendo una característica favorable para el ajuste de los datos. En la gráfica 4.2.1-1 se presenta la función de ajuste y los valores obtenidos  $V_x$  vs  $R$  para  $Z=0,5$ . La función de ajuste obtenida de los datos se presenta en la Eq 4.2.1-1.

$$y = 20,8884 * e^{-1,999x} \quad (\text{Eq 4.2.1-1})$$



**¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar 0 al texto que desea que aparezca aquí.**

- III. A partir de la función de ajuste de los datos se calcula el valor de intersección con el eje de las ordenadas para obtener el valor máximo de vulnerabilidad y el valor de la resistencia para

la variable de control V1. Para calcular el valor característico de acuerdo con las condiciones del gradiente modificado que se evalúa. Para el caso de  $Z=0,5$  (es decir  $V_x= 20,8884/2=10,442$ ) el valor máximo calculado de vulnerabilidad es de 20,8884 cm. La resistencia a partir de la variable de control  $V1=0,5$  se obtiene resolviendo la Eq 4.2.1- 2, dando como resultado final un valor de 0,346 kg, tal como se observa en la Eq 4.2.1-2c.

$$y = 20,8884 * e^{-1,999X} \quad (\text{Eq 4.2.1-2})$$

$$0,5 * 20,8884 = 20,8884 * e^{-1,999X} \quad (\text{Eq 4.2.1-2}^a)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-1,999X} \quad (\text{Eq 4.2.1-2b})$$

$$x = 0,346 = R \quad (\text{Eq 4.2.1-2c})$$

Posteriormente, se obtiene el valor característico de  $T^*$  por medio de la Eq 4.2.1-3. Haciendo uso del valor de la resistencia obtenido en la Eq 4.2.1-2c.

$$T^* = \frac{Z^*}{V1} \quad (\text{Eq 4.2.1-3})$$

$$T^* = \frac{0,5}{0,346} \quad (\text{Eq 4.2.1-3}^a)$$

$$T^* = 1,44 \quad (\text{Eq 4.2.1-3b})$$

En la **Tabla 4.2.1-2** se tabulan los valores obtenidos de la calibración del valor característico  $T^*$  para el gradiente modificado de 0,5. La cual presenta el valor de  $T^*$  para la composición de la curva de vulnerabilidad para su respectivo gradiente modificado.

**Tabla 4.2.1-2:** Valores de calibración del modelo experimental para  $z=0,5$ .

| Modelo | R    | V     | Z    | T*   |
|--------|------|-------|------|------|
|        | 0,35 | 31,38 | 0,50 | 1,44 |

- IV. Consecutivamente, con el valor obtenido de  $T^*$  se genera la curva de vulnerabilidad haciendo uso de la Eq 4.1-15, adicionando la variable característica  $T^*$  calculada y la resistencia dentro del rango de 0,01 a 1,5 de acuerdo a la metodología propuesta por Li et al. (2010). Inicialmente, el parámetro de proporcionalidad  $\delta$  toma un valor de dos, debido a que este será calibrado posteriormente.

Una vez generada la curva de vulnerabilidad, se deben parametrizar los datos obtenidos en el laboratorio de acuerdo con el respectivo  $Z$ , para verificar que los datos de los ensayos se ajusten con la curva de vulnerabilidad generada a partir de la calibración realizada. Esta parametrización se realiza dividiendo el valor en centímetros que se desplazó el dispositivo que recibe el impacto, con el intercepto del eje de las ordenadas de la ecuación de ajuste exponencial de su respectivo gradiente modificado. La verificación se realiza graficando la curva de vulnerabilidad generada a partir de la calibración de  $T^*$  junto con los datos parametrizados del ensayo donde los puntos y la gráfica deben ser lo más colineales. En caso de que los datos parametrizados estén muy alejados de la curva de vulnerabilidad generada es necesario reevaluar la curva de ajuste de estos.

Para el gradiente modificado de 0,5 se genera la curva de vulnerabilidad a partir de la Eq (4.1-14) reemplazando el valor de  $T^*$  por 1,44 calculado en el paso anterior. Se hace uso del valor  $\delta=2$ . En la **Tabla 4.2.1-3** se tabulan los valores generados de vulnerabilidad de acuerdo con los parámetros obtenidos.

**Tabla 4.2.1-3:** Valores de vulnerabilidad estimados de la ecuación de calibración para el modelo experimental en  $Z=0,5$ .

| Z    | R    | T     | V    |
|------|------|-------|------|
| 0,50 | 0,01 | 50,00 | 1,00 |
| 0,50 | 0,10 | 5,00  | 0,92 |
| 0,50 | 0,20 | 2,50  | 0,75 |
| 0,50 | 0,30 | 1,67  | 0,57 |
| 0,50 | 0,40 | 1,25  | 0,43 |
| 0,50 | 0,50 | 1,00  | 0,32 |
| 0,50 | 0,60 | 0,83  | 0,25 |
| 0,50 | 0,70 | 0,71  | 0,20 |
| 0,50 | 0,80 | 0,63  | 0,16 |
| 0,50 | 0,90 | 0,56  | 0,13 |
| 0,50 | 1,00 | 0,50  | 0,11 |
| 0,50 | 1,10 | 0,45  | 0,09 |
| 0,50 | 1,20 | 0,42  | 0,08 |
| 0,50 | 1,30 | 0,38  | 0,07 |
| 0,50 | 1,40 | 0,36  | 0,06 |
| 0,50 | 1,50 | 0,33  | 0,05 |

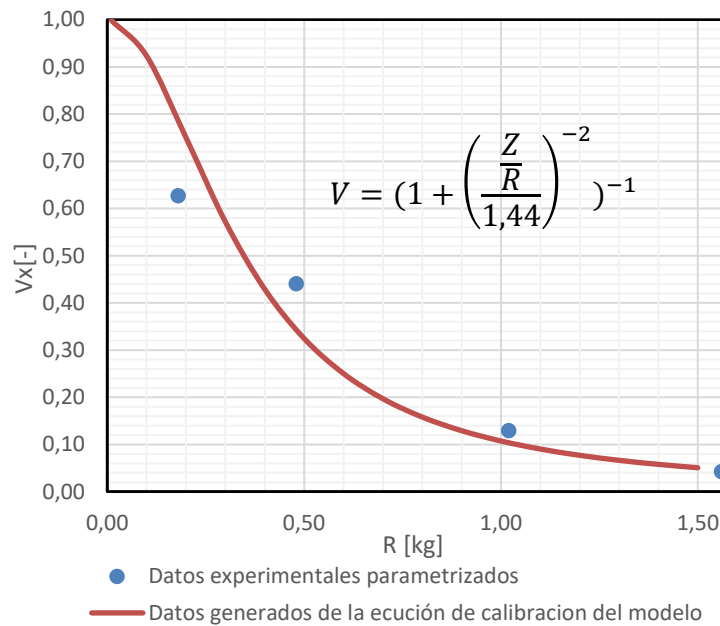
Haciendo uso del valor obtenido de la calibración de  $T^*$  y una resistencia dentro del rango determinado por (Li et al. 2010) se verifica si los valores generados por la ecuación calibrada para  $Z=0,5$  posee el mismo patrón de los ensayos realizados en el modelo a escala para el mismo valor de  $Z$ . Para esto, se realiza la parametrización de los datos de laboratorio obtenidos para el gradiente modificado de 0,5, dividiendo el valor en centímetros que se desplazó el dispositivo que recibe el impacto con el intercepto del eje de las ordenadas de

la ecuación de ajuste exponencial Eq (4.2.-1), obtenido en el paso III. El cálculo realizado de la parametrización se tabula en la **Tabla 4.2.1-4**.

**Tabla 4.2.1-4:** Valores parametrizados de  $V_x$  y el valor obtenido de  $Z/R=T$  para cada uno de los ensayos.

| $VX/V_{xmax}$ [cm] | 20,884 |      |      |      |
|--------------------|--------|------|------|------|
| $VX/V_{xmax}$ [cm] | 0,63   | 0,44 | 0,13 | 0,04 |
| R                  | 0,18   | 0,48 | 1,02 | 1,56 |
| T                  | 2,78   | 1,04 | 0,49 | 0,32 |

Posteriormente, la verificación de la ecuación de ajuste para el valor característico  $T^*$  para los datos del laboratorio se hace por medio de la **Gráfica 4.2.1-2: Valores generados partir de la ecuación** de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos. donde se grafica  $V_x$  parametrizado vs R de los ensayos junto con el valor de vulnerabilidad de calibración calculado y R. En la **Gráfica 4.2.1-2: Valores generados partir de la ecuación** de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos se observa que los valores generados con la ecuación de ajuste del modelo, junto a los valores obtenidos en laboratorio, conciertan una similitud.



**Gráfica 4.2.1-2:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos.

- V. Finalmente, se repite los pasos I-IV para obtener la calibración de  $T^*$  para cada uno de los diferentes gradientes modificados que se realizaron en el modelo a escala, de esta manera, se obtiene un valor característico para cada una de dichas combinaciones.

Al realizar la calibración de  $T^*$  para cada uno de los gradientes modificados se obtienen diferentes valores del valor característico. En las gráficas que van desde la **Gráfica 4.21-3:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,5. **4.21-3** a la **Gráfica 4.21-12: Valores generados partir de la** ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,76. se presentan los gráficos con los que se verificó  $T^*$  para cada uno de los gradientes modificados. Los resultados obtenidos de R y  $T^*$  de la calibración de cada Z se tabulan en la **Tabla 4.2.1-5**. Para identificar la influencia y relación que poseen las características del gradiente modificado con el valor característico  $T^*$ .

**Tabla 4.2.1-5:** Valores obtenidos de la variable de control  $T^*$  para cada una de las combinaciones entre L, xi y H

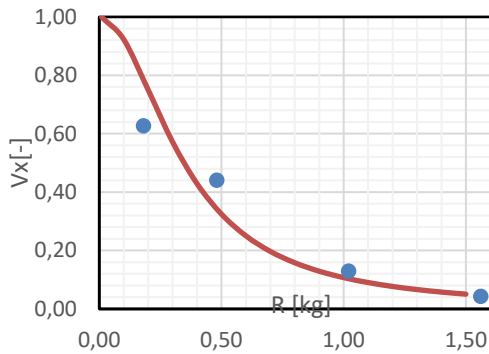
| ID | Xi | L  | L+xi | H  | Z    | R    | $T^*$ |
|----|----|----|------|----|------|------|-------|
| 1  | 5  | 80 | 85   | 40 | 0,47 | 0,21 | 2,22  |
| 2  | 0  | 80 | 80   | 40 | 0,50 | 0,35 | 1,44  |
| 3  | 15 | 80 | 95   | 60 | 0,63 | 0,23 | 2,76  |
| 4  | 10 | 80 | 90   | 60 | 0,67 | 0,39 | 1,70  |
| 5  | 5  | 80 | 85   | 60 | 0,71 | 0,87 | 0,81  |
| 6  | 0  | 80 | 80   | 60 | 0,75 | 1,29 | 0,58  |
| 7  | 15 | 70 | 85   | 70 | 0,76 | 0,50 | 1,52  |
| 8  | 10 | 70 | 80   | 70 | 0,80 | 0,59 | 1,36  |
| 9  | 5  | 70 | 75   | 70 | 0,83 | 0,66 | 1,28  |
| 10 | 0  | 70 | 70   | 70 | 0,89 | 1,49 | 0,60  |

Se observa en la **Tabla 4.2.1-5** que el aumento de la distancia entre la estructura de impacto y rampa tiene cierta relación con la variable de control  $T^*$ . Esta relación consiste en que la variable característica se va a ver reducida cuando xi es cercano a cero, ya que la resistencia de la estructura aumenta inversamente a Xi produciendo un cambio en la intensidad (T) del deslizamiento. El cambio de la resistencia del elemento se genera debido a que este debe aumentar para cumplir la relación que tiene con la variable de control V1.

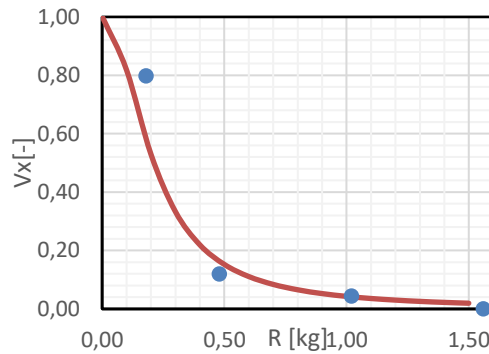
Por último, se hace el promedio de los valores obtenidos de  $T^*$  teniendo este un valor de 1,43. Debido a la relación que posee el valor de  $T^*$  con la variable de control V1 se hace necesario hacer otro análisis para determinar el valor característico más apropiado. Se realiza un análisis por medio de la distancia entre dos puntos, evaluando la distancia de los datos de vulnerabilidad generados a partir de la calibración de  $T^*$  con los datos parametrizados de laboratorio, haciendo uso del valor en el eje de las ordenadas para evaluar dicha distancia, ya que el valor de la abscisa corresponde a la resistencia la cual es igual, tanto en los datos generados como en los datos



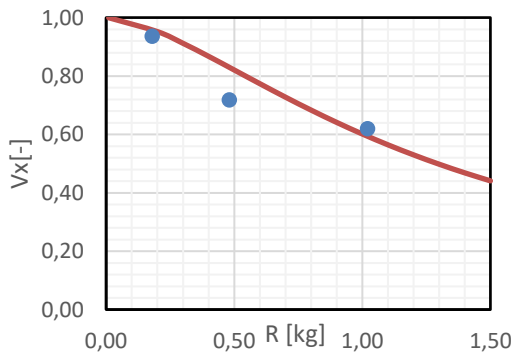
parametrizados de laboratorio. Por lo tanto, la distancia menor entre los datos parametrizados de laboratorio y los datos generados a partir de cada uno de los valores característicos es el valor característico ( $T^*$ ) que mejor se ajuste a los datos. El análisis se realizó evaluando  $T^*$  desde su valor mínimo hasta el valor máximo obtenido, en saltos de 0,5 haciendo uso de  $\delta=2$  inicialmente, obteniendo como valor característico  $T^*=1,3$  para el respectivo delta.



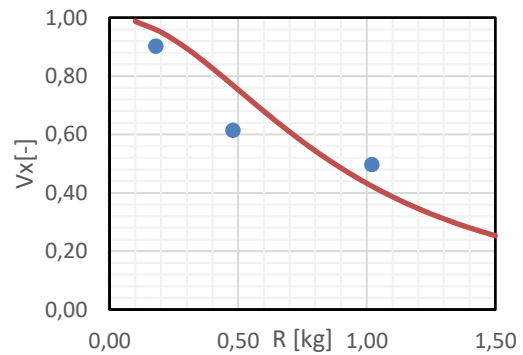
**Gráfica 4.21-3:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,5.



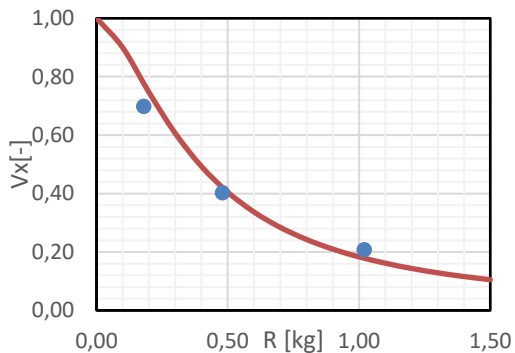
**Gráfica 4.21-4:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,475.



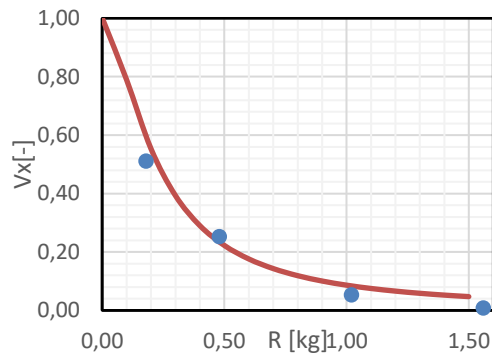
**Gráfica 4.21-5:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,75.



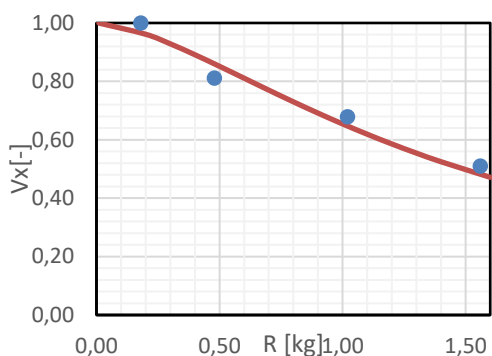
**Gráfica 4.21-6:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,71.



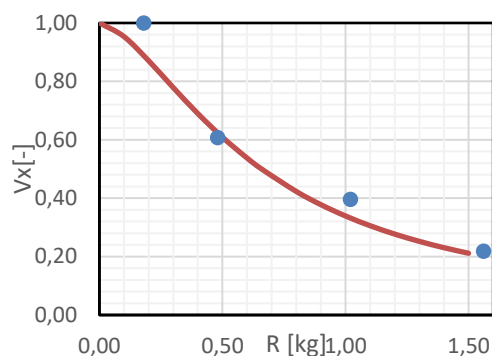
**Gráfica 4.21-7:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,67.



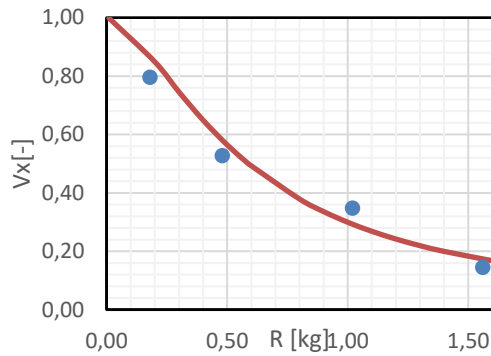
**Gráfica 4.21-8:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,63.



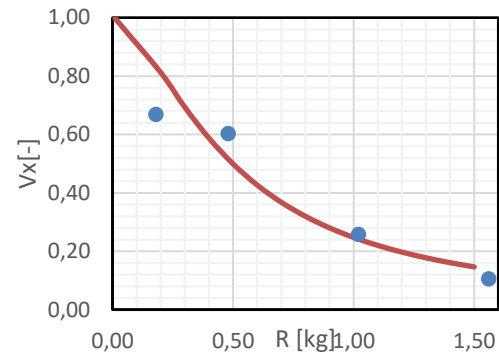
**Gráfica 4.21-9:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,89.



**Gráfica 4.21-10:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,84.



**Gráfica 4.21-11:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,80.

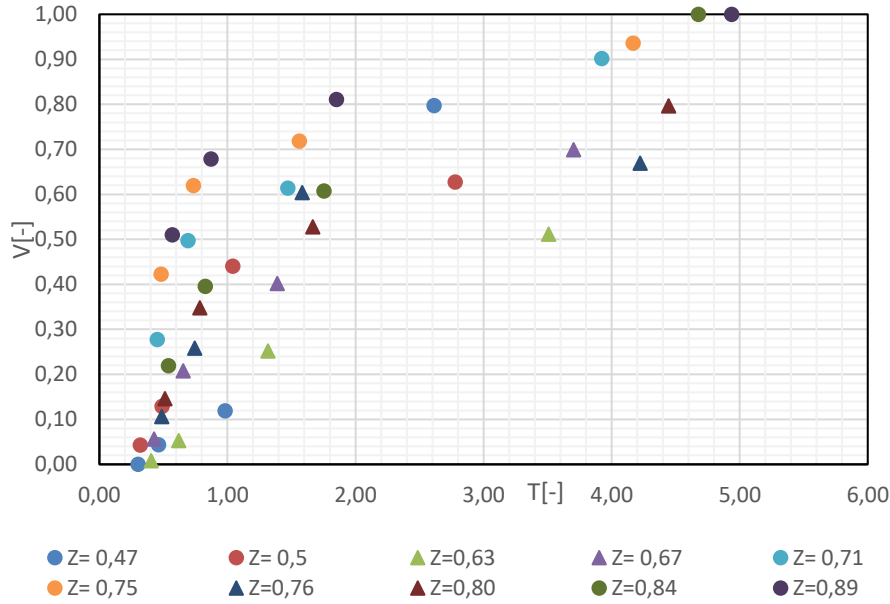


**Gráfica 4.21-12:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos para un gradiente modificado de 0,76.

#### 4.2.2 Calibración del parámetro no adimensional de proporcionalidad $\delta$ .

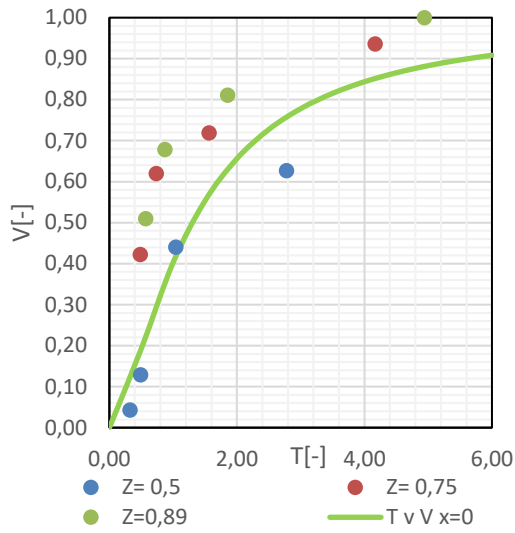
Una vez obtenida una calibración inicial de la variable característica  $T^*$ , se procede con la calibración del parámetro no adimensional de proporcionalidad  $\delta$ .

La calibración del parámetro no adimensional parte de la agrupación de estos con su respectivo valor de  $X_i$  [0, 5, 10, 15], obteniendo un total de cuatro subdivisiones, ya que se presenta una particularidad en la dispersión de los datos. Esta particularidad consiste en una agrupación de los datos dentro de todos los ensayos ejecutados, de acuerdo con el valor de  $X_i$  con que se ejecutaron. En donde las vulnerabilidades obtenidas con valores de  $X_i$ , entre cero y cinco centímetros, se agrupan en la parte superior de todos los datos, y las vulnerabilidades obtenidas con valores entre 10 y 15 en la parte inferior. Este fenómeno se puede detallar en el **Gráfica**, donde los puntos que representan los ensayos con  $X_i$  entre cero y cinco se simbolizan por medio de marcadores de forma circular y los ensayos con  $X_i$  entre 10 y 15 son simbolizados con marcadores triangulares.

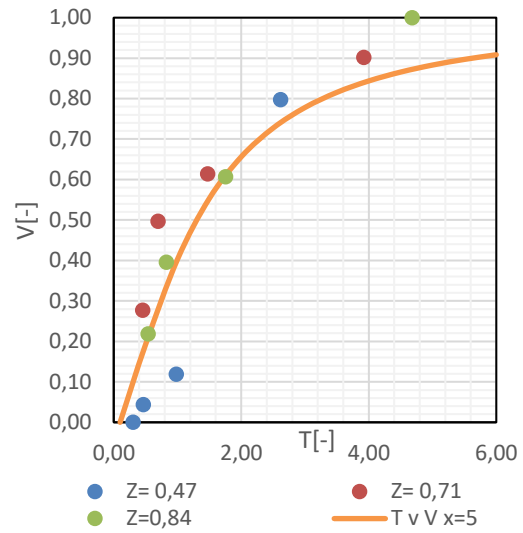


**Gráfica 4.2-1:** Vulnerabilidad vs  $T$ , de lo valores parametrizados obtenidos por medio del modelo a escala.

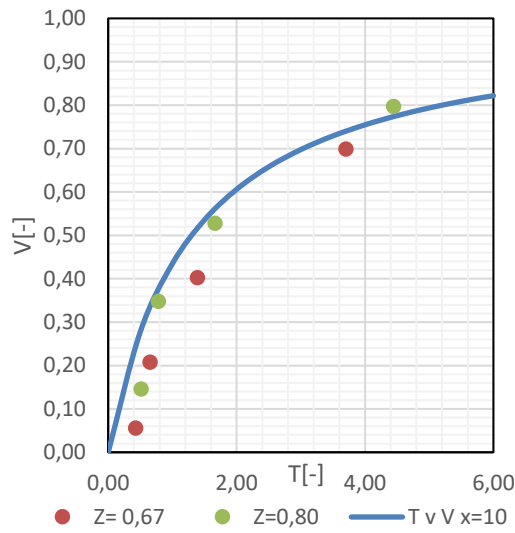
Consecutivamente, inicialmente se realiza una evaluación visual a los dos grupos identificados, la cual consistió en la construcción de una curva de vulnerabilidad a partir de la Eq (6.1-13) con el respectivo valor de  $T^*$  calibrado. Donde se obtuvo que para los datos dentro del rango  $[0, 5]$  de  $X_i$  el valor de  $\delta$  que mejor se ajusta a estos es de 1,5, mientras que para del rango  $[10, 15]$  de  $X_i$   $\delta = 1$  es el valor que posee un mejor ajuste. La **Gráfica 4.2-2: Valores generados partir de la** ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1,5 y **Gráfica 4.2-3: Valores generados partir de la** ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1,5 presentan los valores generados a partir de la calibración de  $\delta = 1,5$  para los datos con  $X_i$  entre  $[0, 5]$ . Por otro lado, la **Gráfica 4.2-4: Valores generados partir de la** ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1. y **Gráfica 4.2-5: Valores generados partir de la** ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1. presentan los valores generados con  $\delta = 1$ . Las graficas generadas a partir de los valores de la calibración preliminar de delta  $\delta$  presentan acoplamiento consolidado con los datos de laboratorio.



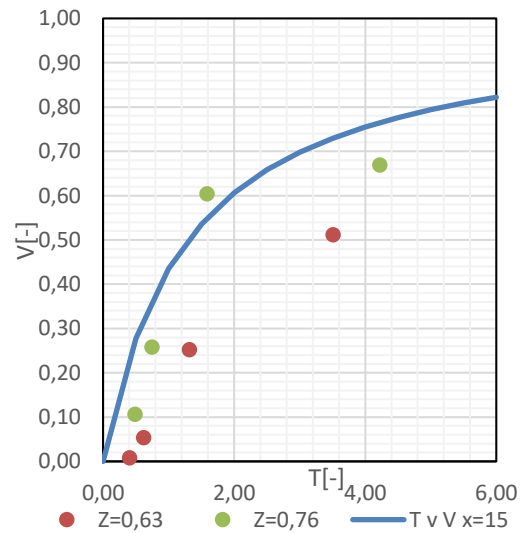
**Gráfica 4.2-2:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1,5.



**Gráfica 4.2-3:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1,5.



**Gráfica 4.2-4:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1.



**Gráfica 4.2-5:** Valores generados partir de la ecuación de ajuste junto con los valores obtenidos de los ensayos con delta igual 1.

### 4.2.3 Calibración global para $T^*$ y $\delta$ .

Puesto que se realizó la calibración de los parámetros de  $T^*$  y  $\delta$  por separado, es necesario realizar una recalibración de estos a partir de los valores obtenidos, ya que la conjunción de estos en la ecuación de calibración influye en el cálculo de la vulnerabilidad.

La recalibración de los parámetros  $T^*$  y  $\delta$ , se realizó sobre la base de un análisis de la distancia entre dos puntos, evaluando cual es la menor distancia entre los valores generados y los datos parametrizados de vulnerabilidad del modelo a escala. Donde, el cálculo se realizó en función a la distancia entre estos en el eje de las ordenadas, debido a que el valor de la abscisa es la resistencia de la estructura, la cual es la misma tanto en los datos generados como en los datos de laboratorio. Por medio de la ecuación de distancia entre dos puntos como se presenta a continuación en la ecuación 4.2.3

$$d = \sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2} \quad (\text{Eq 4.2.3})$$

Para el caso de estudio de esta investigación la Eq (4.2.3) se transforma en la Eq (4.2.3-1)

$$d = \sqrt{(V_2 - V_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (\text{Eq 4.2.3-1})$$

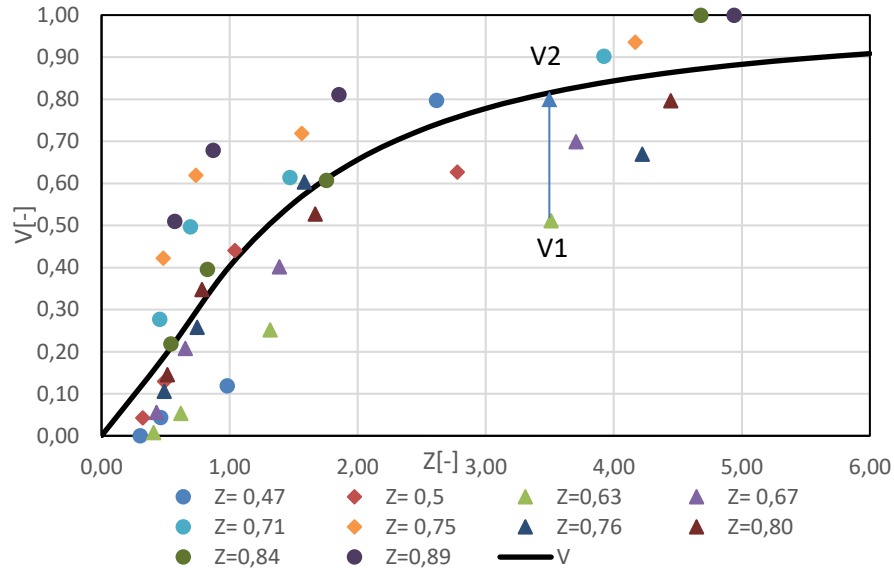
Debido a que los datos obtenidos de laboratorio tienen sus respectivas coordenadas  $V_1$  y  $Z_1$ , el valor de  $Z_1$  es igual al de  $Z_2$  cuando se evalúa en la ecuación 4.1-14. Para obtener el valor de vulnerabilidad para el respectivo gradiente modificado y su resistencia establecida.

Por lo tanto la ecuación para la evaluación de los parámetros que se mejor se ajustan a los datos obtenidos en laboratorio es:

$$d = \sqrt{(V_2 - V_1)^2} \quad (\text{Eq 4.2.3-2})$$

En la **Gráfica 4.2.3-1**: Evaluación de distancia entre la nube de puntos de los ensayos de laboratorio y la curva equivalente a la vulnerabilidad. Se esquematiza la distancia entre un valor

obtenido y una curva de vulnerabilidad que posee los valores de  $T^*$  y  $\delta$ , dentro los rangos ya delimitados.

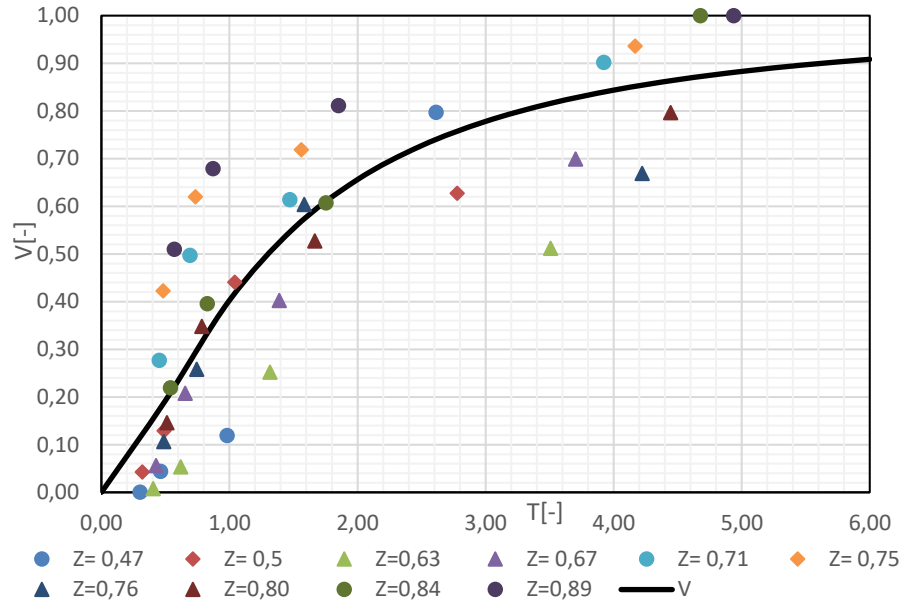


**Gráfica 4.2.3-1:** Evaluación de distancia entre la nube de puntos de los ensayos de laboratorio y la curva equivalente a la vulnerabilidad.

La menor distancia determinada entre los datos de laboratorio y los datos generados a partir de la combinación entre los valores de las calibraciones preliminares obtenidas, serán los valores calibrados para  $T^*$  y  $\delta$  que mejor se ajuste a los datos. La evaluación se realizó con el rango de  $T^*$  [1,1-1,3] y  $\delta$  [1-1,5]. Donde se realizó un total 40 posibles combinaciones entre estos. Se obtiene como valor característico  $T^*=1,3$  y  $\delta =1,5$ , los cuales son los parámetros que mejor se ajustan, ya que son los que menor distancia tienen con los datos parametrizados del modelo a escala.

Finalmente, se reescribe la Eq (4.1-14) como la Eq (4.2.3-1), Siendo la ecuación de calibración para el modelo a escala de laboratorio. En la **Gráfica 4.2.3-2** se esquematiza los valores de vulnerabilidad generados a partir de la Eq (4.2.3-1) y los valores parametrizados de los ensayos de laboratorio realizados en el modelo a escala.

$$\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{T}{1,3} \right)^{-1,5} + 1 \right]^{-1} \quad (\text{Eq 4.2.3-1})$$



**Gráfica 4.2.3-2:** Ecuación de vulnerabilidad calibrada con  $T^*=1,3$  y  $\delta =1,5$ , junto con los datos parametrizados de laboratorio.



## 5 Análisis de resultados

### 5.1 Parametrización de la resistencia de a estructuras para la simulación en el modelo a escala.

La relación que existe entre la resistencia de la estructura es calculada por medio de la metodología propuesta por (Li et al. 2010) y la resistencia del modelo la cual es controlable, para obtener la masa con la que se debe simular el modelo que represente la resistencia de la estructura. Para hallar esta relación se hace uso de la metodología de Guimaraes-Silva (2015).

(Guimaraes-Silva 2015)Guimaraes-Silva (2015) determinó la resistencia de las estructuras basándose en la tipología estructural definida por Hermelín (1999) y Li et al. (2010), que evalúa parámetros de resistencia con la , producto de un análisis de la estructura de acuerdo con características intrínsecas de ella. Donde el valor de la tipología estructural se determina por el autor subjetivamente por medio de diferentes parámetros.

$$R_{str} = \sqrt[4]{\xi_{sfd} * \xi_{sty} * \xi_{smn} * \xi_{sht}} \quad \text{Eq (5.1-1)}$$

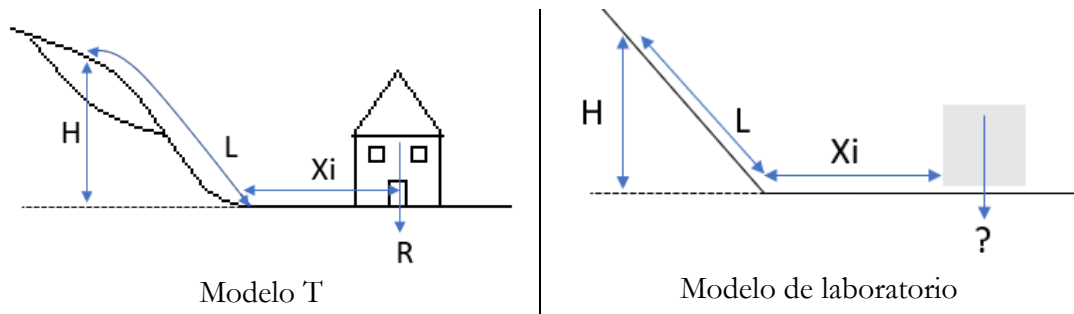
Donde,

- $\xi_{sfd}$ : Factor de resistencia de la edificación de acuerdo con la profundidad de la fundación.
- $\xi_{sty}$ : Factor de resistencia para la tipología de la estructura (Reforzada o no Reforzada)
- $\xi_{smn}$ : Factor de resistencia en función al estado de mantenimiento de la estructura.
- $\xi_{sht}$ : Factor de resistencia por número de pisos.

El autor comprende la resistencia como el reflejo de la capacidad de los elementos vulnerables para resistir la acción del deslizamiento de tierra con cierto grado de severidad. El cual es

representado por medio de un indicador para las estructuras que son amenazadas por un deslizamiento de tierra. De acuerdo con la metodología propuesta por Li et al. (2010) para determinar la resistencia de las estructuras, se obtiene que la resistencia máxima que puede tener una estructura es de 1,5 refiriéndose matemáticamente a los valores máximos de los factores de resistencia y un  $\xi_{sfd}$  calculado para una profundidad de cimentación de 30 m, mientras que la mínima resistencia es de 0,143, teniendo en cuenta una profundidad de una cimentación superficial 0,5 m.

Consecuentemente, aplicando la ecuación del modelo de Guimaraes-Silva (2015). Se determina la vulnerabilidad para gradientes modificados en el intervalo [0,1 - 1], variando para cada uno de estos la resistencia dentro del rango de [0,1 - 1,5 ] de acuerdo a lo estipulado por Li et al. (2010). Tras haber calculado la vulnerabilidad, se hace uso de la ecuación calibrada Eq (4.2.3-1) para el modelo a escala, para deducir el valor de la resistencia que se va a usar en el modelo. La deducción se realizó por medio de la solución de la ecuación (4.2.3-1) con los parámetros Z, R y V obtenidos en la metodología de Guimaraes-Silva (2015). En la se esquematiza el procedimiento realizado para obtener la resistencia que se debe usar para simular el modelo de laboratorio y evaluar situaciones de caso In-Situ de una situación. Se ejemplifica la situación en la que se tiene un gradiente modificado de 0,3 y una estructura con una resistencia de 0,7 la cual obtuvo una vulnerabilidad 0,29.



**Ilustración 5.1-1:** Esquematación del procedimiento para obtener el valor de R en el modelo a escala.

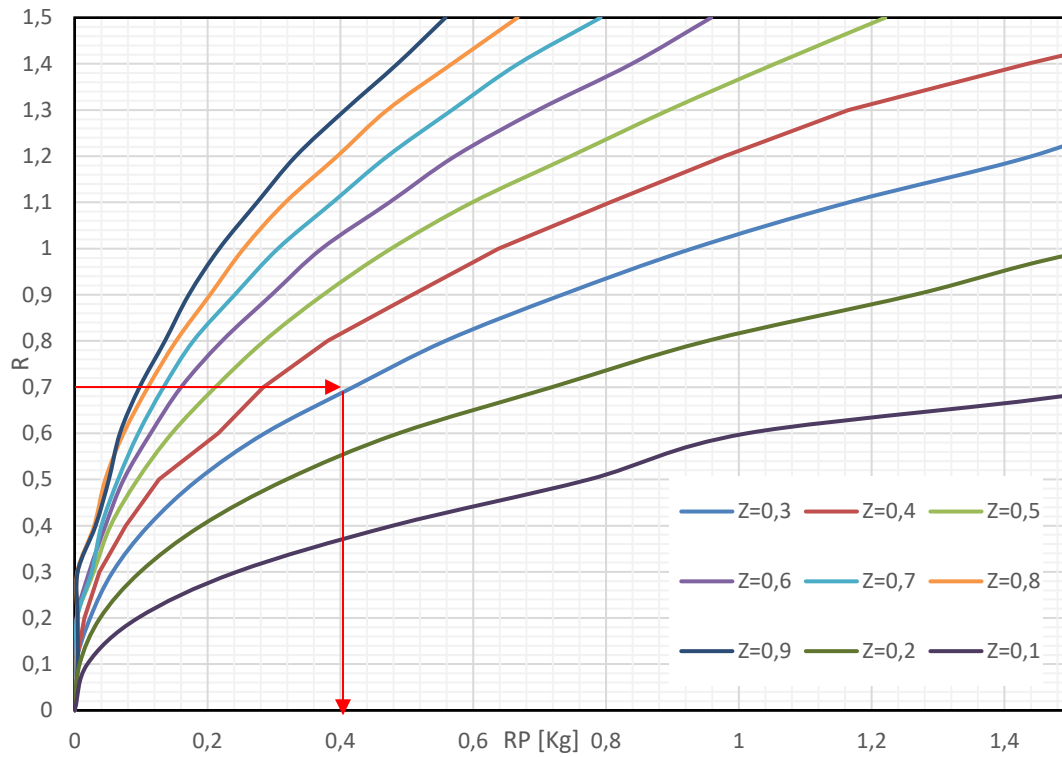
|   |  |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">Modelo T</p> $\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{T}{0,55} \right)^{-3,5} + 1 \right]^{-1}$ <p>Donde</p> $Z = \frac{H}{L + d} = 0,3$ $R = 0,7$ $T = 0,4285$ $\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{0,57}{0,4285} \right)^{-3,5} + 1 \right]^{-1} = 0,29$ | <p style="text-align: center;">Modelo a escala</p> $\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{T}{1,3} \right)^{-1,5} + 1 \right]^{-1}$ <p>Donde</p> $Z = \frac{H}{L + d} = 0,3$ $R = \text{¿?}$ $T = \frac{Z}{R}$ $\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{0,3}{\frac{R}{1,3}} \right)^{-1,5} + 1 \right]^{-1} = 0,29$ |
|---|--|

Resolviendo la ecuación del modelo a escala haciendo uso de Solver.

|  |  |
|--|--|
| $\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{0,57}{0,4285} \right)^{-3,5} + 1 \right]^{-1} = 0,53$ | $\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{0,3}{\frac{0,419}{1,3}} \right)^{-1,5} + 1 \right]^{-1} = 0,53$ |
|--|--|

De esta forma se obtiene el valor de resistencia de 0,419 Kg. El cuál, es el valor en kilogramos de la masa resistente en el modelo a escala para la simulación de una situación real en campo (en el cual la resistencia estructural del edificio es de 0,7 según la ecuación 5.1-1) o la evaluación de la vulnerabilidad por medio de la ecuación ya calibrada. Este procedimiento se realizó para los gradientes entre [0, 1] y con resistencia de [0, 1,5] para cada uno de los gradientes modificados evaluados.

Para un uso práctico se realizó la construcción de una curva de resistencia para obtener la masa en kilogramos. La **Gráfica** presenta la curva de resistencia donde el usuario ingresa en el eje de las ordenadas el valor de resistencia determinado en campo por medio de la metodología de Li et al. (2010) y se desplaza perpendicularmente al eje de las ordenadas, hasta ubicar la curva que representa el gradiente modificado que quiere evaluar de acuerdo con los datos recopilados en campo, y así obtener el valor de la resistencia en kilogramos para el uso, tanto del modelo a escala como la ecuación de calibración. Adicionalmente, se realiza se ejemplifica la situación en la que se tiene un gradiente modificado de 0,3 y una estructura con una resistencia de 0,7 la cual obtuvo una vulnerabilidad 0,29.



**Gráfica 5.1-1:** Curvas para la determinación de la renitencia en el modelo a escala para la simulación de situación de evaluación de vulnerabilidad real.

Debido a que el modelo propuesto por Guimaraes-Silva (2015) presenta una universalidad, ya que tiene la capacidad de representar, en teoría, el daño de la estructura debido a la interacción de diferentes tipos de movimientos de masa y diferentes tipos de estructuras, se hace uso de esta para la parametrización de la resistencia en el modelo a escala de laboratorio.

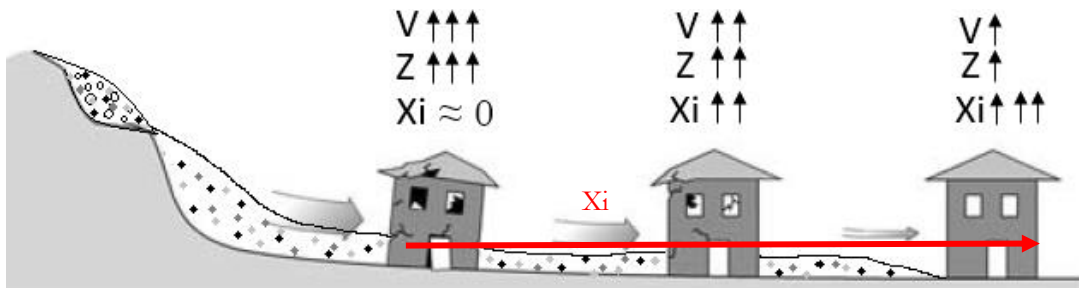
Se puede hacer uso de los dos métodos para obtener el valor de la masa que represente la resistencia de la estructura real, y realizar su respectiva evaluación de vulnerabilidad física debido al impacto del deslizamiento.

## 5.2 Relación entre la vulnerabilidad física de la estructura y la geometría del talud.

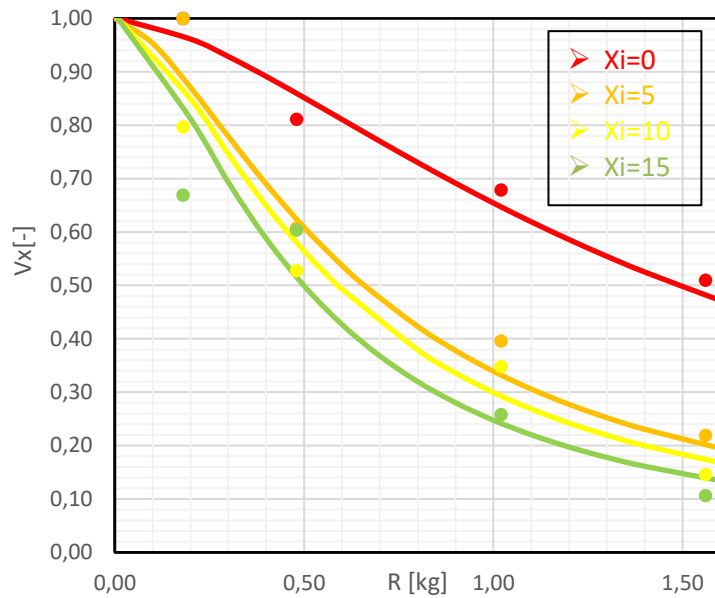
Cuando se hace referencia a la geometría del talud se alude específicamente al gradiente modificado, el cual está en función de H, L y D o  $X_i$ , referente a este trabajo investigativo.

En el desarrollo de este trabajo se encontró que existe una fuerte relación entre estas dos variables. Donde la variable  $X_i$  es el parámetro más influyente en esta interacción. Afectando directamente el gradiente modificado; cuanto mayor sea el valor de  $X_i$ , menor es la vulnerabilidad. Como se muestra en las **Gráfica 5.2-1: Efecto de  $X_i$  en el gradiente modificado y la vulnerabilidad  $V$  vs Resistencia para  $Z=1$** . Esquema fue tomado y modificado de Michael J Crozier, Glade, and Anderson (2005), **Gráfica 5.2-2: Efecto de  $X_i$  en el gradiente modificado y la vulnerabilidad  $V$  vs Resistencia para  $Z=0,75$** . Esquema fue tomado y modificado de Michael J Crozier, Glade, and Anderson (2005) y **Gráfica 5.2-3: Efecto de  $X_i$  en el gradiente modificado y la vulnerabilidad  $V$  vs Resistencia para  $Z=0,5$** . Esquema fue tomado y modificado de Michael J Crozier, Glade, and Anderson (2005) La relación entre la vulnerabilidad física de las estructuras y la geometría del talud que amenaza una estructura. Las graficas se obtuvieron a partir de la ecuación de calibración del modelo para cada respectivo gradiente modificado, el procedimiento para la obtención de cada curva se detalló en el subcapítulo 4.2.1 la cual hace uso de la ecuación 4.1-14

$$\frac{V}{V_T} = \left[ \left( \frac{T}{T^*} \right)^{-\delta} + 1 \right]^{-1} \quad \text{Eq(4.1 - 14)}$$

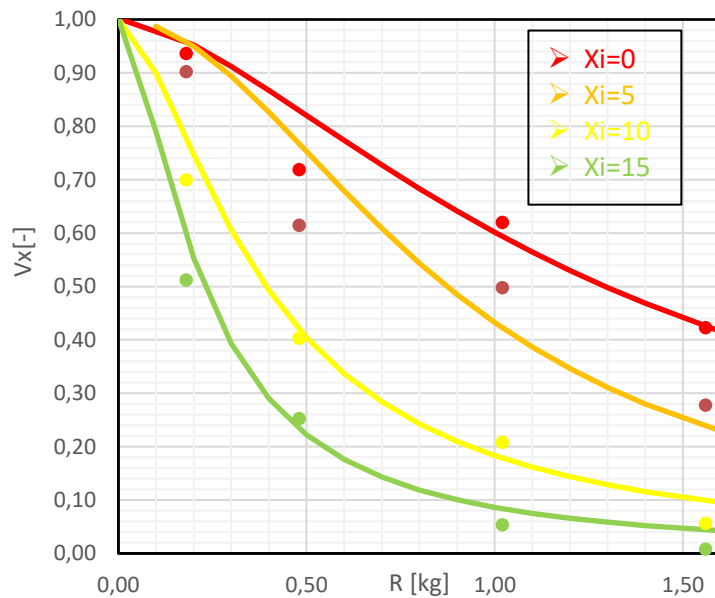


- Para  $Z = [0,89, 0,84, 0,80, 0,76]$ .  
 $X_i = [0, 5, 10, 15]$ .
- Datos experimentales parametrizados  $Z=0,89$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,89$
  - Datos experimentales parametrizados  $Z=0,84$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,84$
  - Datos experimentales parametrizados  $Z=0,80$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,80$
  - Datos experimentales parametrizados  $Z=0,76$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,76$

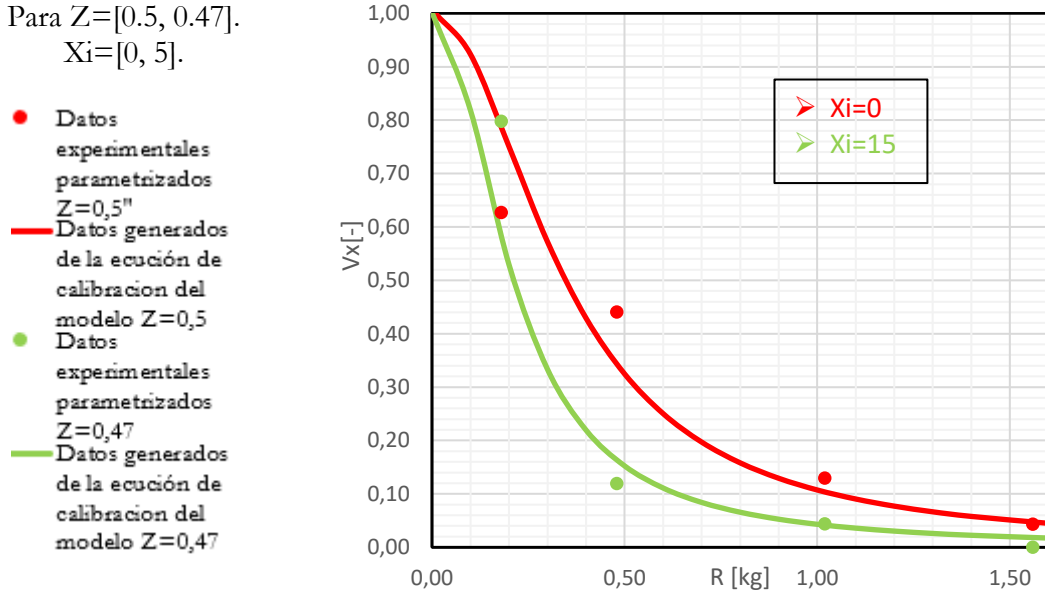


**Gráfica 5.2-1:** Efecto de  $X_i$  en el gradiente modificado y la vulnerabilidad  $V$  vs Resistencia para  $Z=1$ . Esquema fue tomado y modificado de Michael J Crozier, Glade, and Anderson (2005)

- Para  $Z = [0,75, 0,71, 0,67, 0,63]$ .  
 $X_i = [0, 5, 10, 15]$ .
- Datos experimentales parametrizados  $Z=0,75$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,75$
  - Datos experimentales parametrizados  $Z=0,71$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,71$
  - Datos experimentales parametrizados  $Z=0,67$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,67$
  - Datos experimentales parametrizados  $Z=0,63$
  - Datos generados de la ecuación de calibración del modelo  $Z=0,63$



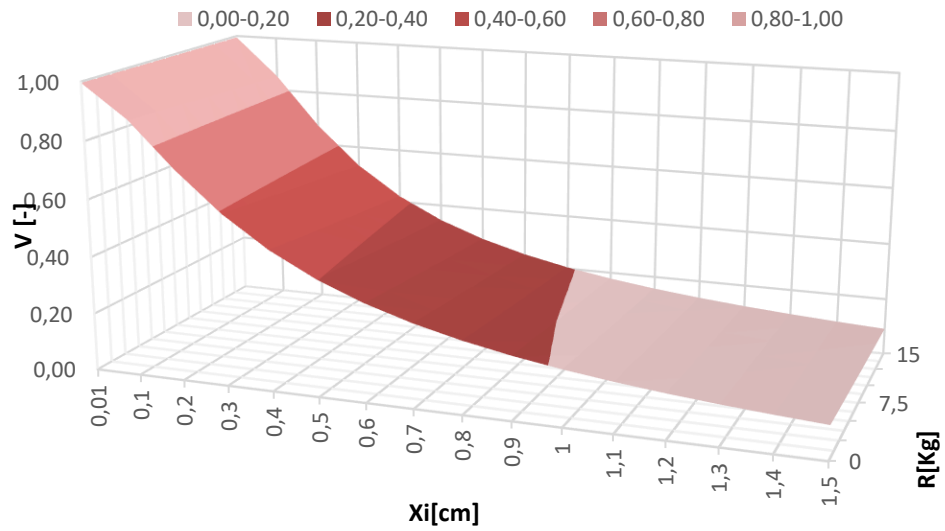
**Gráfica 5.2-2:** Efecto de  $X_i$  en el gradiente modificado y la vulnerabilidad  $V$  vs Resistencia para  $Z=0,75$ . Esquema fue tomado y modificado de Michael J Crozier, Glade, and Anderson (2005)



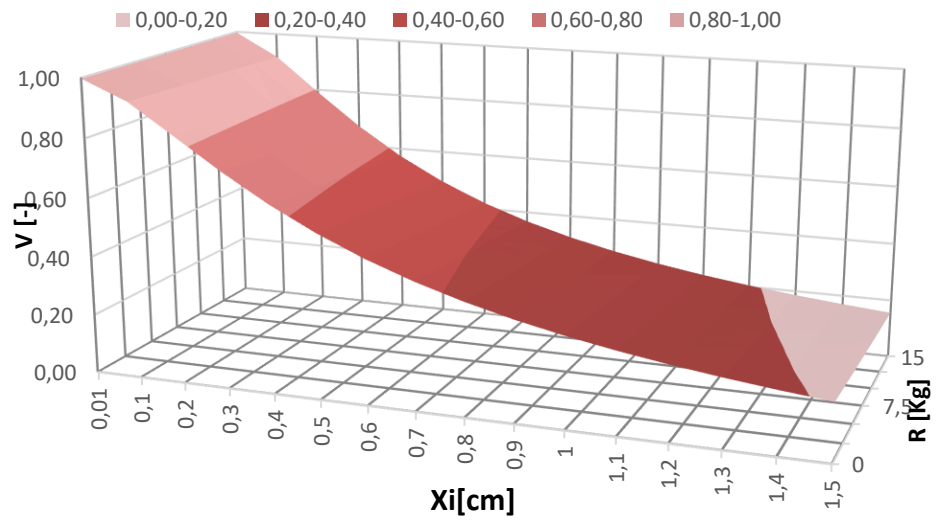
**Gráfica 5.2-3:** Efecto de  $X_i$  en el gradiente modificado y la vulnerabilidad  $V$  vs Resistencia para  $Z=0,5$ . Esquema fue tomado y modificado de Michael J Crozier, Glade, and Anderson (2005)

Conforme a los gráficos antes presentados se observa claramente una relación directa de  $X_i$  con la vulnerabilidad física. Entendiéndose como, la estructura que se encuentre más distanciada de la zona de acumulación del deslizamiento tiene una susceptibilidad menor a sufrir daños. Por otro lado, las estructuras que se encuentran más cercanas al epicentro del deslizamiento son aquellas que son más susceptibles a tener daños considerables debido al impacto del deslizamiento como se evidencia en la **Gráfica 5.2-4:** Vulnerabilidad en función de la resistencia y d. para  $Z=0,89$ , **Gráfica 5.2-5:** Vulnerabilidad en función de la resistencia y d. para  $Z=0,75$  y **Gráfica 5.2-5:** Vulnerabilidad en función de la resistencia y d. para  $Z=0,75$ . En donde se evalúa la vulnerabilidad física en función a  $X_i$  de la estructura.

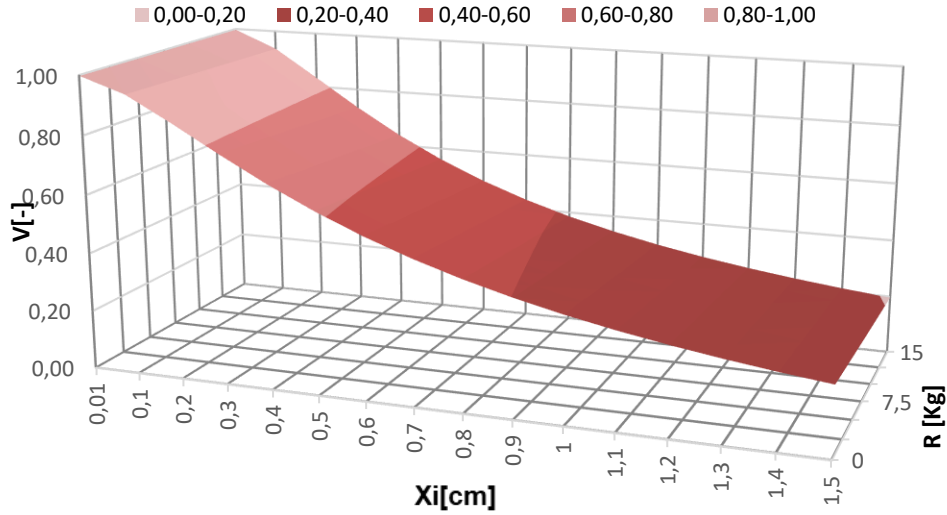




**Gráfica 5.2-4:** Vulnerabilidad en función de la resistencia y d. para  $Z=0,89$



**Gráfica 5.2-5:** Vulnerabilidad en función de la resistencia y d. para  $Z=0,75$



**Gráfica 5.2-6:** Vulnerabilidad en función de la resistencia y d. para  $Z=0,5$

A pesar de que la variable  $X_i$  (d) es importante para la evaluación de la vulnerabilidad, es notable no desconocer que las variables  $H$  y  $L$  son igualmente fundamentales. Puesto que, ellas son las encargadas de la energía de destrucción del deslizamiento, y aunque la estructura se encuentre a una distancia prudente, esta puede ser susceptible a tener daños considerables. Por ejemplo, observando la **Gráfica** se tiene  $H = 80$  m,  $L=90$  m,  $R=0,7$  y  $d= 15$  m. De acuerdo con esta relación, se obtiene una vulnerabilidad de 0,43, donde este puede ser obtenido con las siguientes condiciones  $H=60$  m,  $L=80$  m,  $R=0,7$  y  $d=0$ . Evidenciando que se hace imperativo la evaluación de los parámetros de  $H$  y  $L$  para la evaluación de la vulnerabilidad física. Sin embargo, si se desea realizar una gestión del riesgo a partir de  $X_i$  (d) es necesario evaluar por separado las estructuras a las cuales se les está calculando su respectiva vulnerabilidad estructural

---

## 6 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, una investigación detallada de la literatura técnica, la metodología usada para la construcción del modelo experimental a escala, la calibración del modelo y el análisis de resultados se presentan las conclusiones generales de esta investigación:

- Se diseñó y construyó un modelo teórico práctico a escala que evalúa la vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos de tierra. Donde la vulnerabilidad es directamente proporcional a la cota en donde inicia el movimiento de tierra, e inversamente proporcional al producto entre la resistencia de la estructura y la distancia recorrida por el deslizamiento. Siendo la base teórica el Principio de Proporcionalidad Natural propuesto por Juárez-Badillo (2010) y la resistencia de la estructura se determina inicialmente por Li et al. (2010) parametrizada por medio del modelo T propuesto por Guimaraes-Silva (2015).
- Se diseñaron y ejecutaron experimentos en el modelo de laboratorio a partir de la base de datos de Kang and Kim (2016); Guimaraes-Silva (2015). Logrando interpretar la relación de las características de intensidad que influyen en la capacidad de daño del deslizamiento en función de la resistencia de la estructura. Inicialmente, por medio del resultado obtenido del desplazamiento del elemento impactado en el modelo de laboratorio, mostrando que a medida que la estructura se encontrase más cerca del epicentro del deslizamiento mayor será su valor de vulnerabilidad. Posteriormente, para mantener esta relación en la calibración del modelo a escala de laboratorio se obtuvieron los coeficientes de proporcionalidad adimensional y el T característico a partir de los datos obtenidos al ejecutar los ensayos.
- Se logra la reconstrucción de situaciones de riesgo In-Situ para evaluar la vulnerabilidad física de estructuras a través de la intensidad de la amenaza en un modelo a escala de laboratorio el cual puede ser modificado y reconstruido a partir de los planos (adjuntados en los anexos de este trabajo) de cada una de las piezas que lo comprenden

y en el que logra reproducir un rango extendido de parámetros geométricos del talud y resistencia de las estructuras. Donde, los parámetros que se deben recopilar del talud y de la estructura no son complejos de obtener.

- Se apreció la relación entre las características geométricas del talud que generan su respectiva intensidad y el daño que puede ocasionar este. En el caso de esta investigación se evaluó la vulnerabilidad física de estructuras por medio de parámetros geométricos del talud que amenaza una estructura.
- Se identificó la relación entre la vulnerabilidad física y el impacto de deslizamientos de masa, por medio del gradiente modificado. Ya que, cuanto mayor es el gradiente modificado, mayor es la vulnerabilidad (capacidad de daño del deslizamiento). Por otro lado, se muestra claramente que para valores altos de  $X_i$  del gradiente modificado la vulnerabilidad disminuye significativamente, ya que esta relación genera un aumento de la resistencia de la estructura. Siendo estos parámetros los que gobiernan la intensidad del deslizamiento, son los más importantes en los procesos de planificación de la gestión de riesgos cuando la resistencia de las estructuras se considera una medida aceptable para la reducción y el control de riesgos.
- Se construyó una curva equivalente de vulnerabilidad para el modelo a escala de laboratorio la cual se mueve a través de la nube de datos de los ensayos realizados en función de los parámetros de intensidad y resistencia. Logrando abarcar las diferentes posibles situaciones que se logren medir en campo para la evaluación de la vulnerabilidad física de una estructura. La cual se validó por medio del modelo T propuesto por Guimaraes-Silva (2015) a través de la parametrización de la resistencia del modelo de laboratorio.
- Si se desea realizar una gestión del riesgo a partir de  $X_i$  es necesario evaluar por separado las estructuras a las cuales se les está calculando su respectiva vulnerabilidad física. Ya que influyen diferentes parámetros de intensidad como lo son la distancia de desplazamiento del deslizamiento la cota mayor a la cual inició el deslizamiento.

- Se identificó la universalidad del modelo T' propuesto por Guimaraes-Silva (2015), el cual tiene la capacidad de representar teóricamente el daño de la estructura debido a la interacción del impacto de un deslizamiento de ladera. En la que se puede evaluar cualquier tipo de estructura y movimiento de tierra. Además, la metodología y base teórica utilizada para la realización de su trabajo, es el fundamento para la construcción de este prototipo a escala para la evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras.

## **6.1 Aplicaciones del prototipo a escala y sugerencias para futuras investigaciones.**

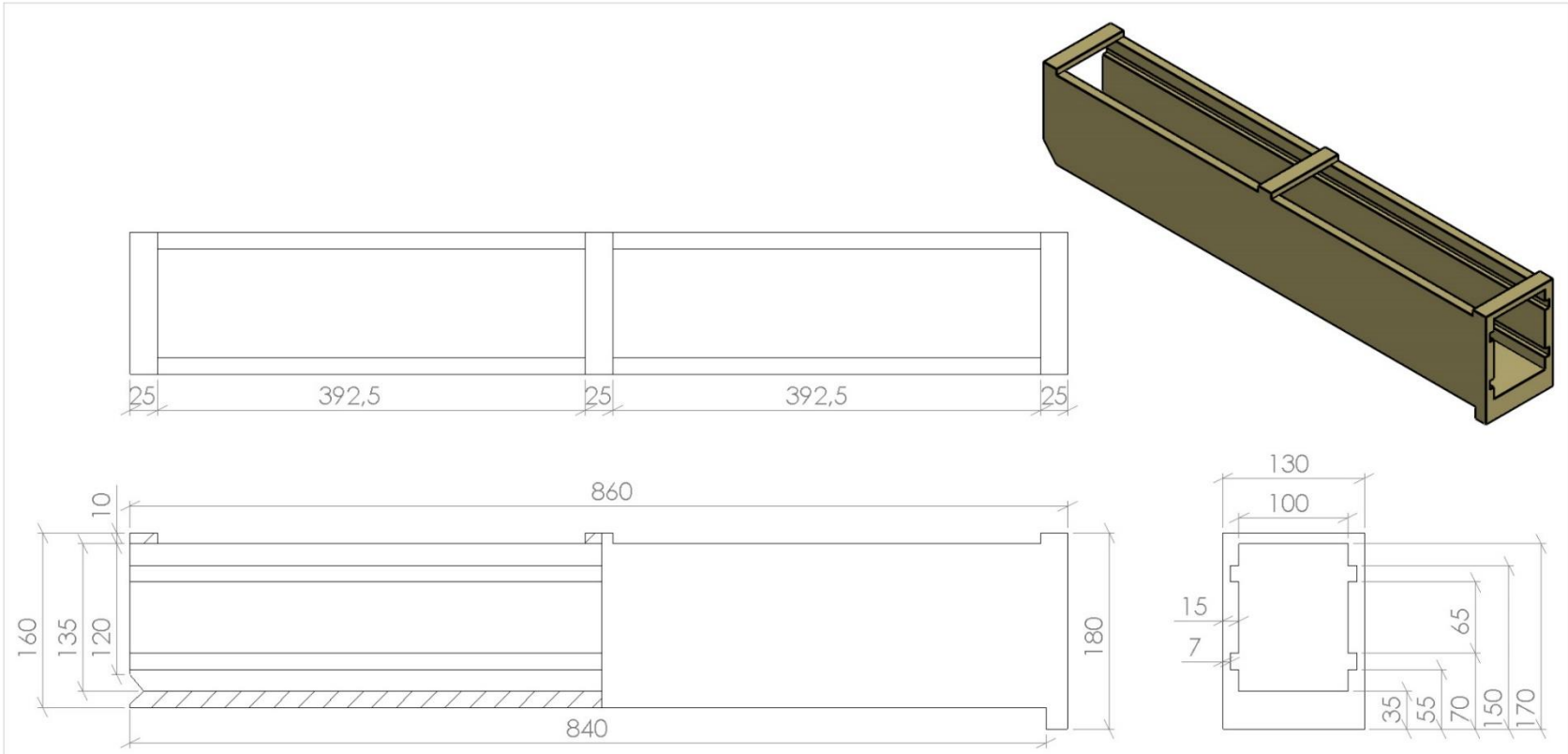
La aplicación de este trabajo tiene diferentes enfoques, ya que puede ser utilizado para fines investigativos o prácticos.

Para fines investigativos, este trabajo demostró que, por medio de un modelo a escala realizado en laboratorio, se logra evaluar la vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos, por medio de una metodología fisicomatemática que describe el fenómeno, en donde se podrá evaluar un sinnúmero de modelaciones a partir de las relaciones geométricas de talud y la resistencia de la estructura. Además, servirá como base para futuras investigaciones, ya que el modelo no tiene complejidad para su replicación y modificación de acuerdo con las variables en las que esté interesado el investigador. Por ejemplo: replicando el modelo y haciendo uso de un dispositivo que mida la velocidad o haciendo el registro videográfico, se logra obtener la vulnerabilidad física a partir de la velocidad de impacto del deslizamiento. De la misma forma, se puede hacer uso de diferentes materiales de deslizamiento variando la humedad de estos para la evaluación de la vulnerabilidad física en función del material y el índice de humedad. Sobre la base teórica fisicomatemática utilizada en este trabajo, es posible la modificación de diferentes elementos del modelo para logara afinar o evaluar variables de interés. Demostrando que, a partir de esta investigación se puede evaluar variables que intervienen en un deslizamiento de

masa en un modelo a escala, para la evaluación de la vulnerabilidad física de estructuras impactadas por deslizamientos y la administración del riesgo.

En segundo lugar, para fines prácticos, el modelo a escala puede ser utilizado para hacer un manejo de la administración del riesgo In-Situ, en donde el modelo sirve como herramienta que proveerá información para la planificación de la gestión del riesgo. Por ejemplo: un usuario, entidad, ingeniero, etc. encargado de la planificación y gestión del riesgo de un proyecto que consiste en la construcción de unas edificaciones las cuales tienen como amenaza una ladera que colinda con estas. Por lo tanto, evalúan la vulnerabilidad física estructural del proyecto haciendo uso ya sea del modelo T o cualquier otra metodología propuesta de acuerdo con la información que poseen, obteniendo un valor de vulnerabilidad que no les satisface. Al no ser satisfactorio el valor obtenido, se puede hacer uso del modelo a escala de laboratorio. Donde, se debe modelar un experimento con las mismas condiciones geométricas que en campo, y a partir del gradiente modificado determinar la masa a utilizar que simula la resistencia de la estructura por medio de la **Gráfica**. Tras haber ejecutado el ensayo mínimo tres veces, puede evaluar visualmente la respuesta de la estructura al ser impactada por la masa y además, obtener un valor de vulnerabilidad por medio de la ecuación calibrada de este. Adicionalmente, el valor obtenido de vulnerabilidad puede ser modificado por medio de Xi y ver la respuesta de la estructura en el modelo a escala. Así, se logra obtener cual es la distancia en la que el proyecto debe ser construida para obtener un valor de vulnerabilidad estructural que satisfaga la administración de riesgo a deslizamientos de masa.

## **A. Anexo: Plano sección de impacto.**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:

**SECCIÓN DE IMPACTO**

DIBUJO NO.

1

A4

Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  
Revisó:  
Fecha: 22/09/2020

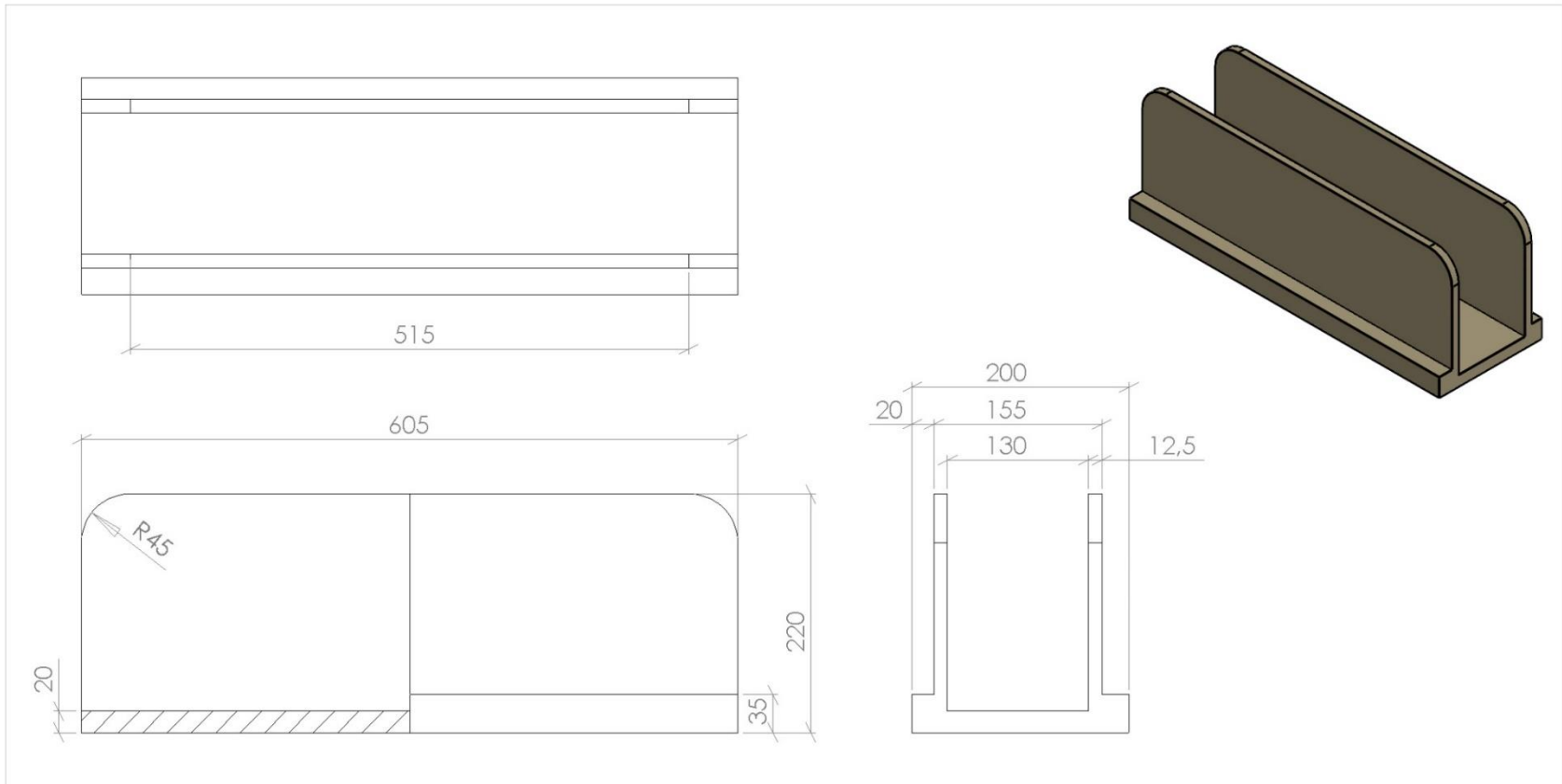
ESCALA 1:100

HOJA 1 DE 12





**B. Anexo: Plano elemento que realiza la conexión entre la rampa y la sección de impacto.**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:  
**ELEMENTO QUE REALIZA LA CONEXIÓN  
ENTRE LA RAMPA Y LA SECCIÓN DE  
IMPACTO**

Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  
Revisó:  
Fecha: 22/09/2020

DIBUJO NO. 2

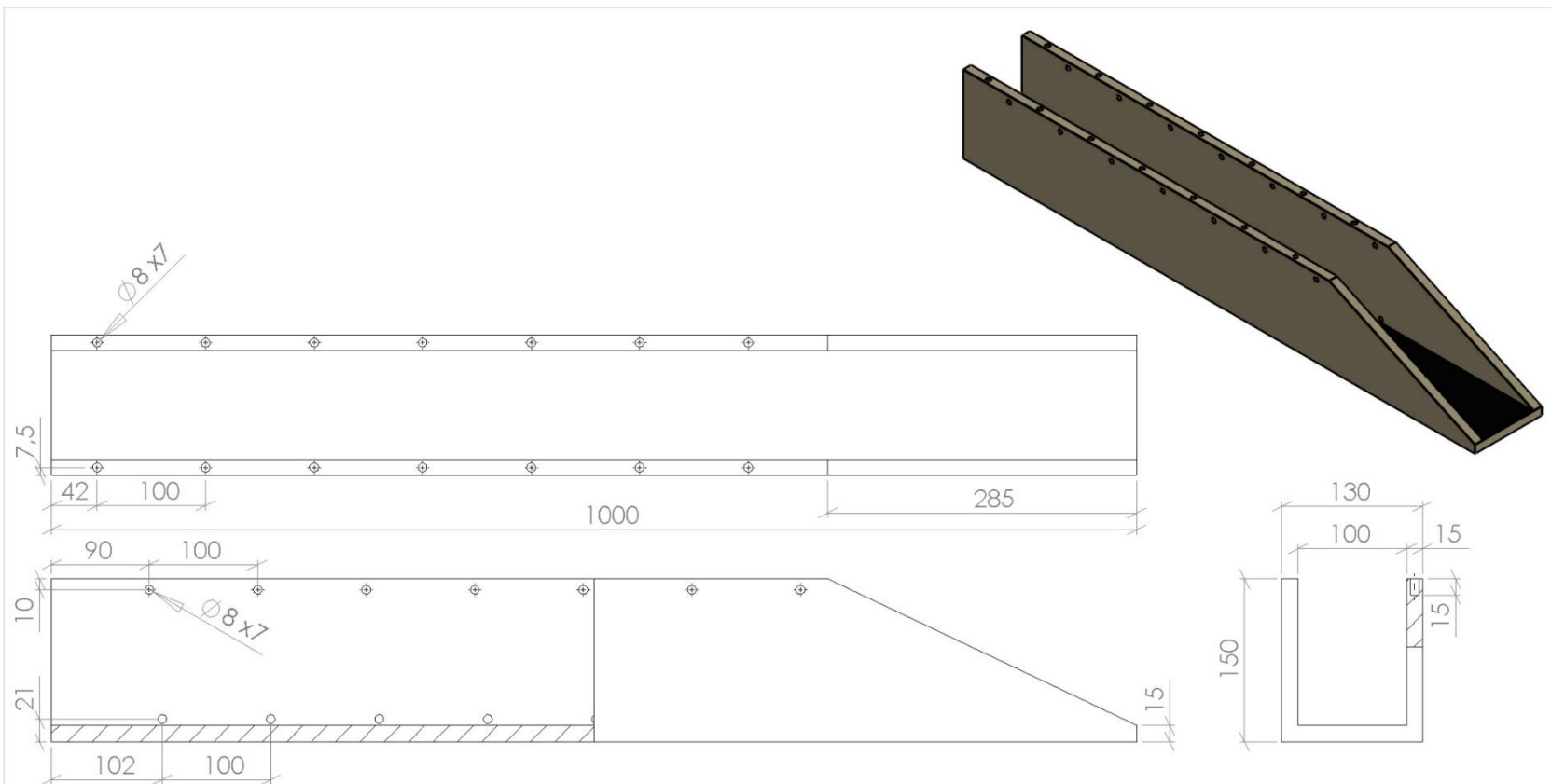
A4

ESCALA 1:100

HOJA 2 DE 12



## **C. Anexo: Plano rampa del modelo.**



Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  
 Revisó:  
 Fecha: 22/09/2020

Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
 SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:

**RAMPA DEL MODELO**

DIBUJO NO.

3

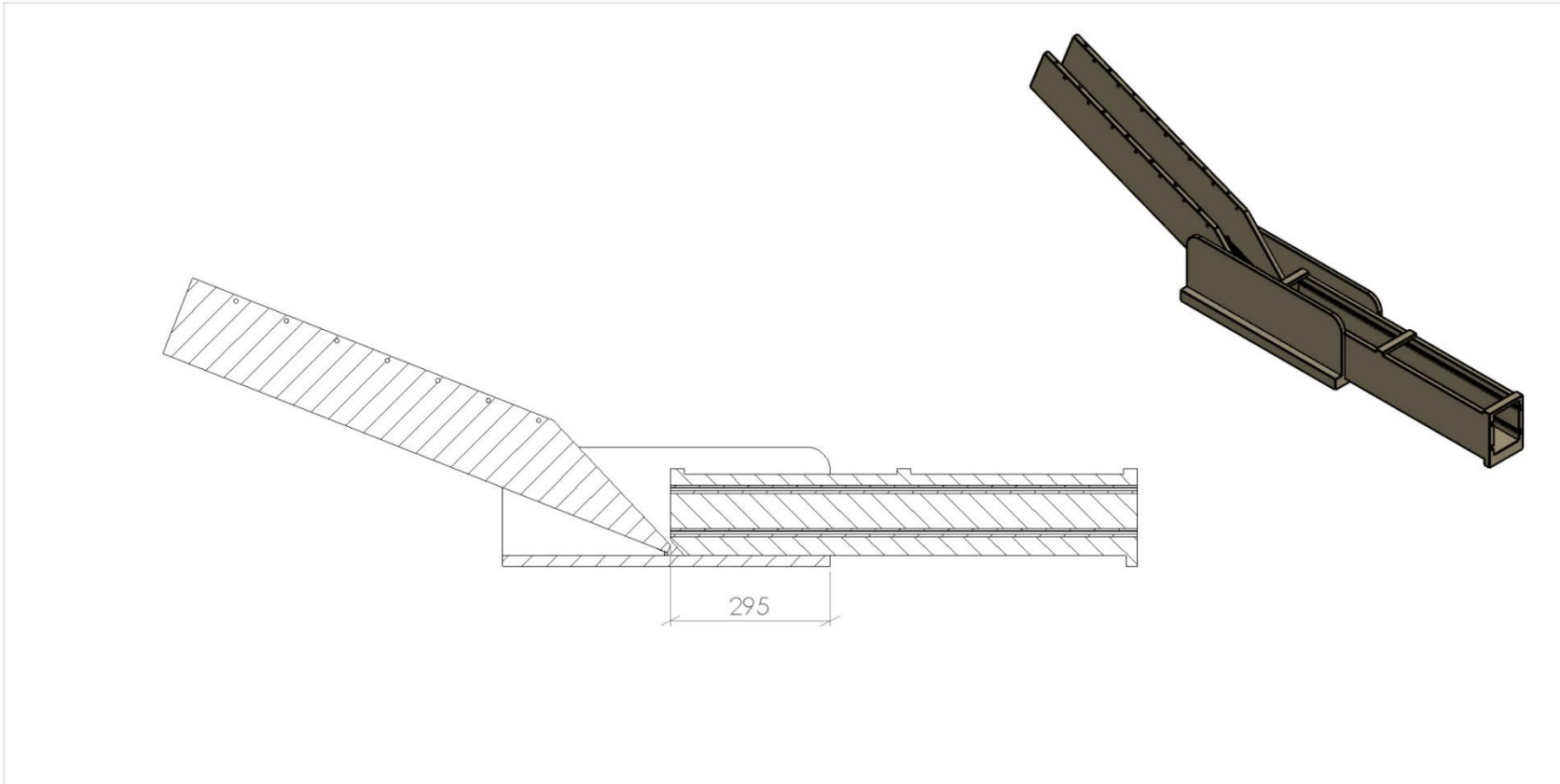
A4


ESCALA 1:100

HOJA 3 DE 12



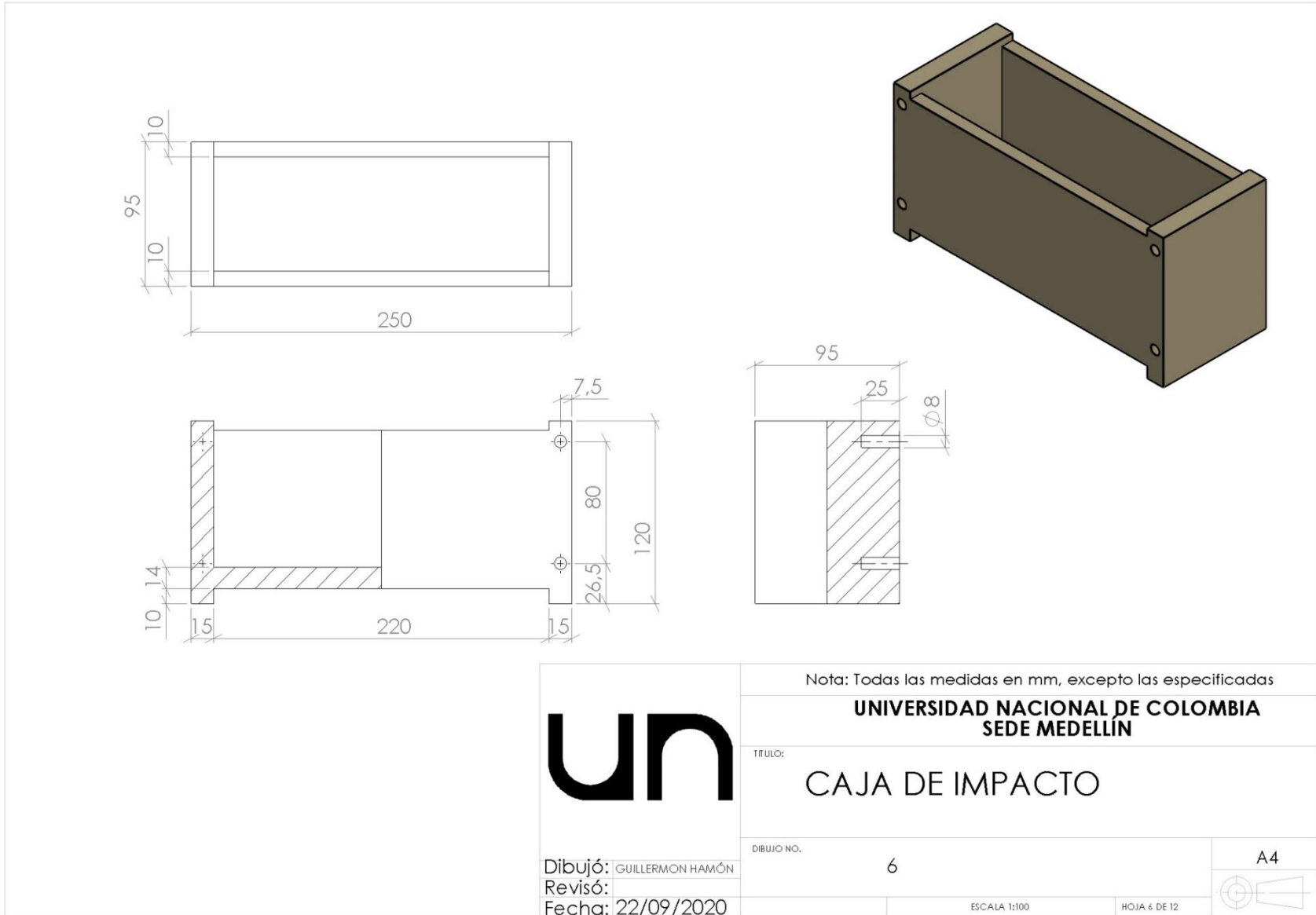
## **D. Anexo: Plano Ensamble número 1.**



|  |   |              |
|--|---|--------------|
|  | Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas  |              |
|  | <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA<br/>SEDE MEDELLÍN</b> |              |
| TÍTULO:  | <b>ENSABLE NÚMERO 01</b>                                  |              |
| DIBUJO NO.   | 4   | A4           |
| Dibujó: GUILLERMO HAMÓN<br>Revisó:<br>Fecha: 22/09/2020                              | ESCALA 1:100  | HOJA 4 DE 12 |

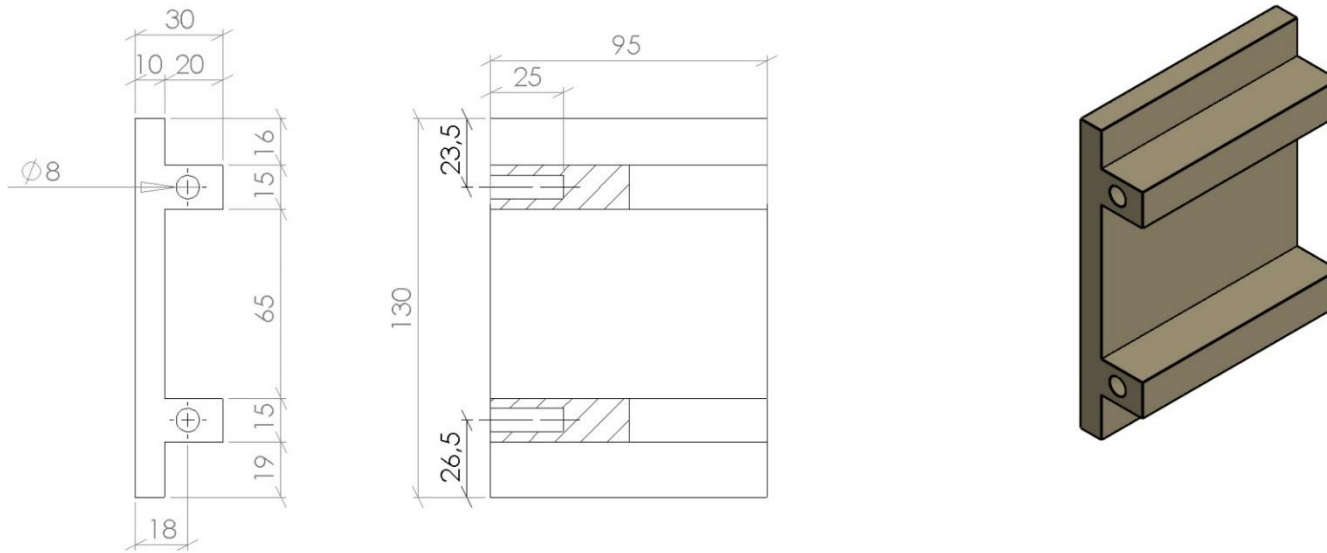


## **E. Anexo: Plano caja de impacto.**





## **F. Anexo: Plano tapa de impacto.**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:

**TAPA DE IMPACTO**

DIBUJO NO.

7

A4

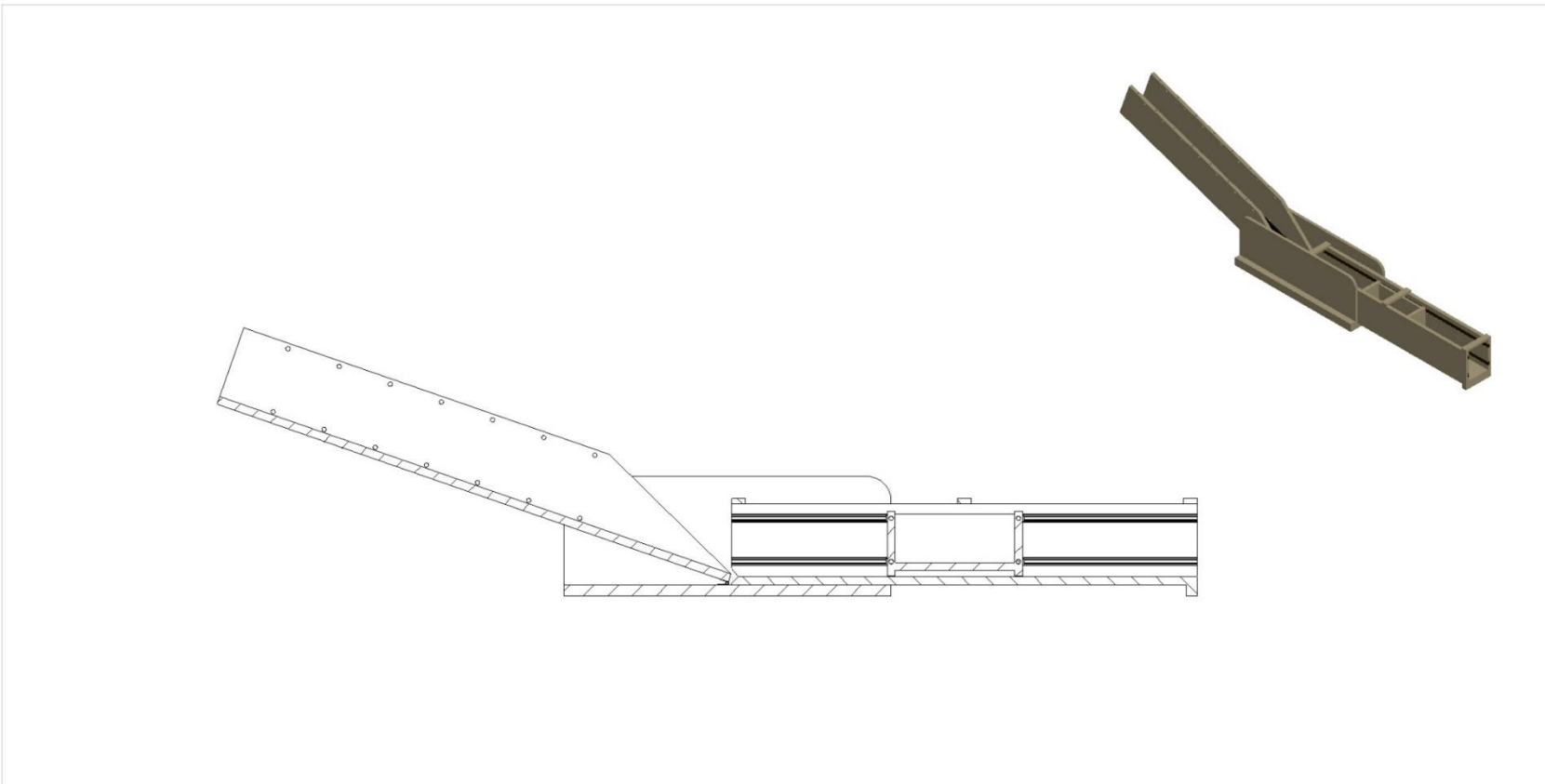
Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  
Revisó:  
Fecha: 22/09/2020

ESCALA 1:100

HOJA 7 DE 12



## **G. Anexo: Ensamble número 3.**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:

**ENSAMBLE NÚMERO 3**

DIBUJO NO.

8

A4

Dibujó: GUILLERMO HAMÓN

Revisó:

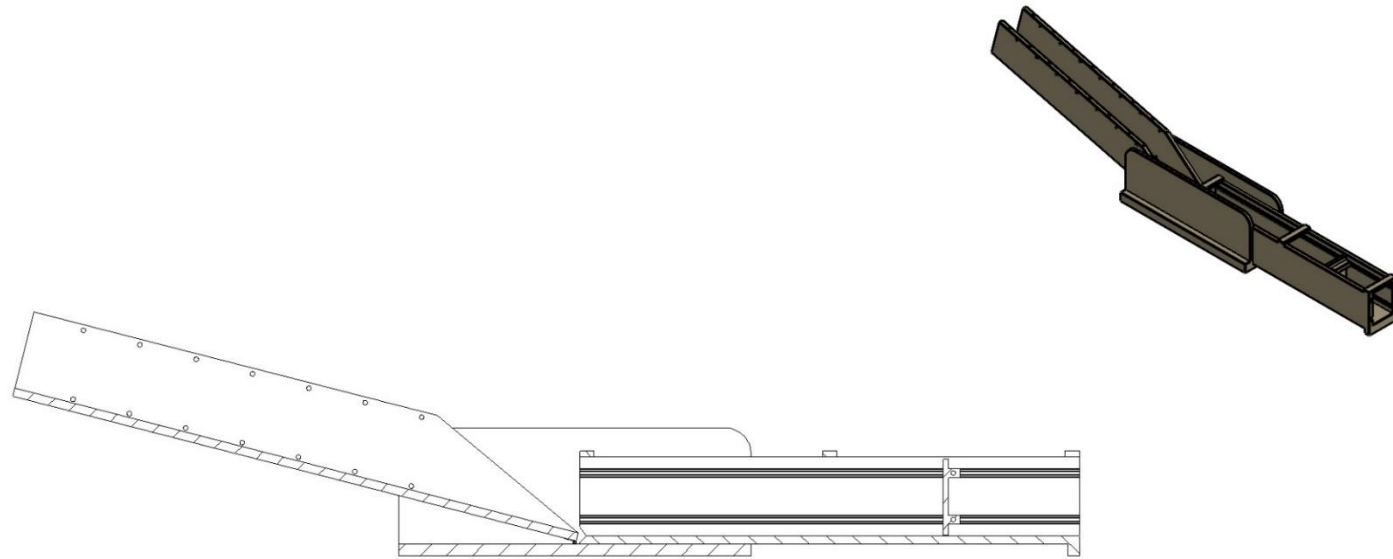
Fecha: 22/09/2020

ESCALA 1:100

HOJA 8 DE 12



## **H. Anexo: Ensamble número 4.**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:

**ENSAMBLE NÚMERO 4**

DIBUJO NO.

9

A4

Dibujó: GUILLERMO HAMÓN

Revisó:

Fecha: 22/09/2020

ESCALA 1:100

HOJA 9 DE 12



## **I. Anexo: Plano mecanismo de la compuerta de liberación del material.**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:  
**MECANISMO DE LA COMPUERTA DE  
LIBERACIÓN DEL MATERIAL**



Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  
Revisó:  
Fecha: 22/09/2020

DIBUJO NO. 10

A4

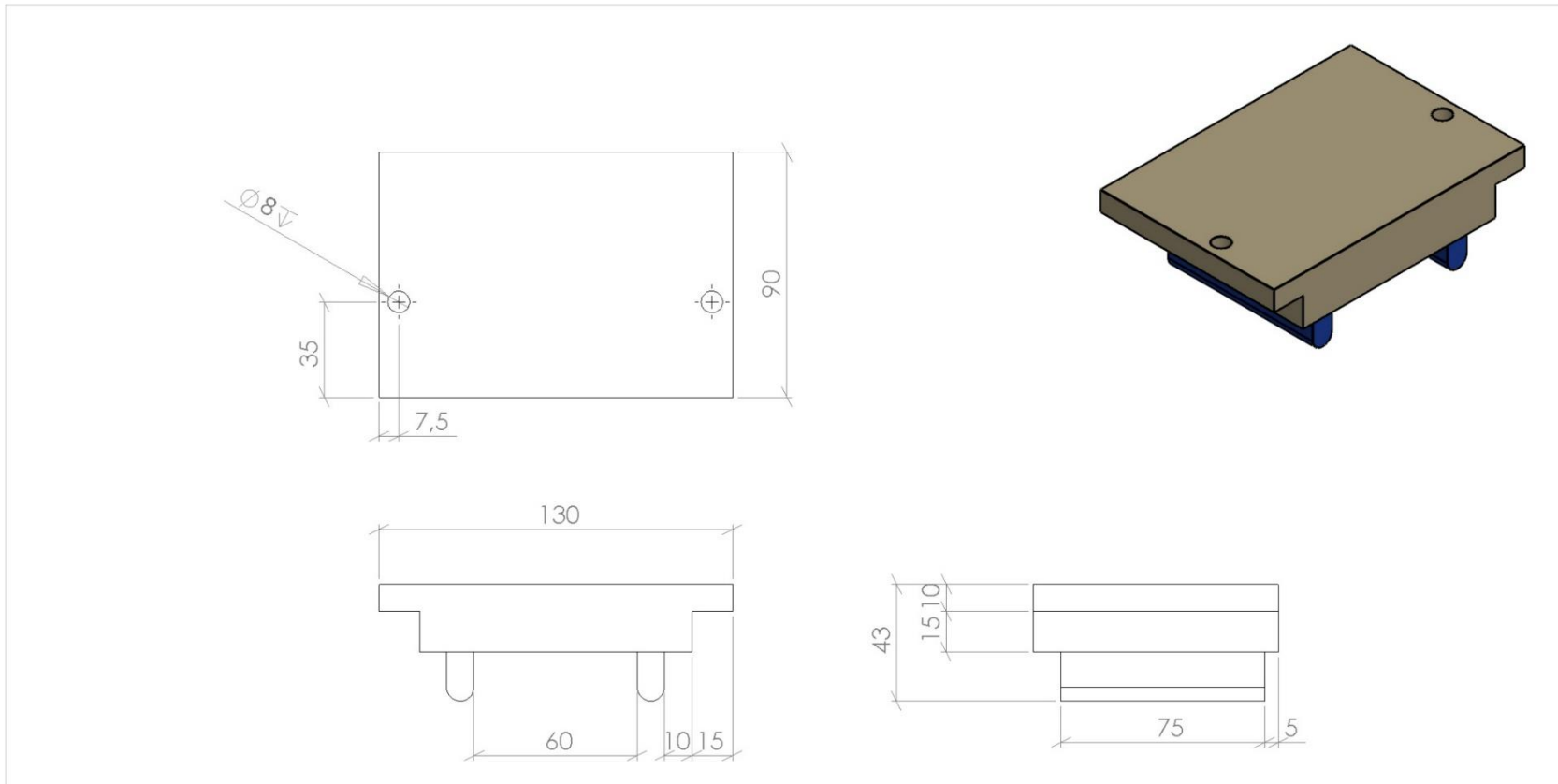
ESCALA 1:100

HOJA 10 DE 12





## **J. Anexo: Plano compuerta de liberación de material**



Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN**

TÍTULO:  
**MECANISMO DE LA COMPUERTA DE  
LIBERACIÓN DEL MATERIAL**

Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  
Revisó:  
Fecha: 22/09/2020

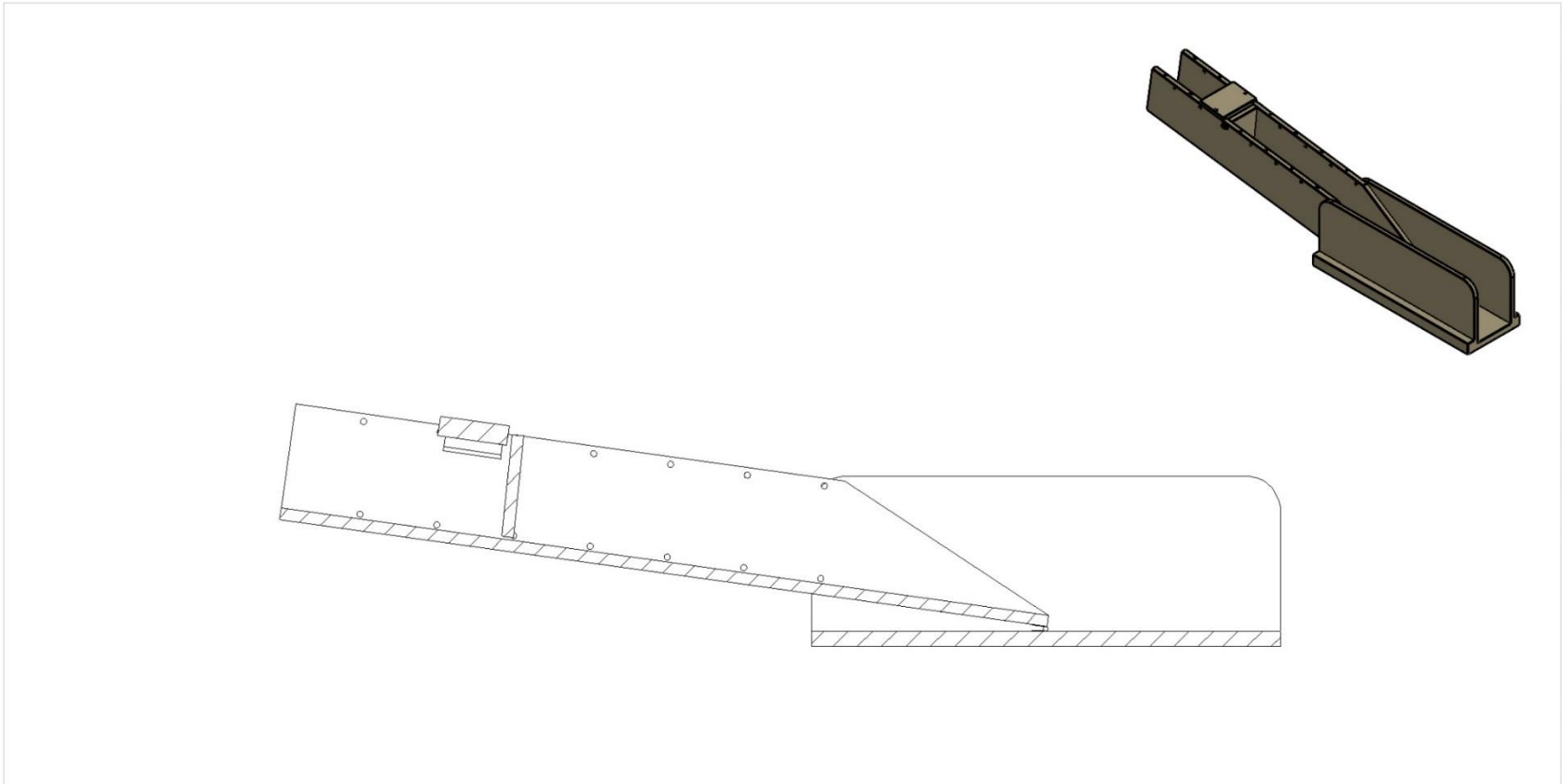
DIBUJO NO. 10



A4

ESCALA 1:100 HOJA 10 DE 12



## **K. Anexo: Ensamble número 5**



|  |   |   |
|--|---|---|
|  | Nota: Todas las medidas en mm, excepto las especificadas  |   |
|  | <b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA<br/>SEDE MEDELLÍN</b> |   |
|  | TÍTULO:<br><b>ESAMBLE NÚMERO 5</b>                        |   |
| Dibujó: GUILLERMO HAMÓN  | DIBUJO NO. 12   | A4  |
| Revisó:  |   |  |
| Fecha: 22/09/2020  | ESCALA 1:100  | HOJA 12 DE 12   |

## L. Anexo: Banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Nova Friburgo, Brasil, en Enero del 2011 tomado de Guimaraes Silva (2015)

| IDdesl | H (m) | IDestruct | d (m) | R    | Z   |
|--------|-------|-----------|-------|------|-----|
| 13937  | 20    | 3317-1    | 59    | 0,5  | 0,3 |
| 14088  | 20    | 3438-5    | 52    | 0,6  | 0,4 |
| 13933  | 34    | 3517-5    | 48    | 0,79 | 0,7 |
| 13931  | 15    | 3530-3    | 63    | 0,6  | 0,2 |
| 14089  | 12    | 3692-2    | 57    | 0,71 | 0,2 |
| 14089  | 12    | 3692-3    | 25    | 0,79 | 0,5 |
| 13973  | 13    | 3817-1    | 64    | 0,6  | 0,2 |
| 13973  | 13    | 3817-2    | 32    | 0,79 | 0,4 |
| 13930  | 35    | 3834-1    | 74    | 0,6  | 0,5 |
| 13935  | 34    | 3975-3    | 71    | 0,79 | 0,5 |
| 13942  | 42    | 4089-2    | 109   | 0,79 | 0,4 |
| 13042  | 20    | 4224-6    | 42    | 0,5  | 0,5 |
| 13964  | 28    | 4251-2    | 63    | 0,5  | 0,4 |
| 13458  | 65    | 4342-5    | 145   | 0,79 | 0,4 |
| 13458  | 65    | 4342-6    | 144   | 0,96 | 0,5 |
| 13975  | 55    | 4479-10   | 167   | 0,6  | 0,3 |
| 13975  | 55    | 4479-11   | 129   | 0,6  | 0,4 |
| 13975  | 55    | 4479-12   | 119   | 0,6  | 0,5 |
| 13975  | 55    | 4479-13   | 109   | 0,6  | 0,5 |
| 13965  | 48    | 4549-1    | 59    | 0,79 | 0,8 |
| 13965  | 48    | 4549-2    | 46    | 0,79 | 1   |
| 13965  | 48    | 4549-3    | 64    | 0,79 | 0,7 |

Donde: IDdesl identificación del deslizamiento, H (m) diferencia entre la cota mayor y cota menor del deslizamiento, IDestruct identificación de la estructura impactada, d (m) longitud desplazada por el deslizamiento, R resistencia de la estructura, Z gradiente modificado.

**M. Anexo: Banco de datos de los deslizamientos ocurridos en Corea del Sur entre Julio y Agosto del 2011. Tomado de (Kang and Kim 2016)**

| <b>Region</b> | <b>L/H</b> | <b>H/L</b> |
|---------------|------------|------------|
| Miryang       | 4,3        | 0,2        |
| Yongin        | 3,4        | 0,3        |
| Pocheon I     | 5          | 0,2        |
| Pocheon S     | 3,2        | 0,3        |
| Dongducheon H | 5,7        | 0,2        |
| Gwacheon      | 4,4        | 0,2        |
| Seocho        | 4,4        | 0,2        |
| Dongducheon S | 3,1        | 0,3        |
| Chuncheon_1   | 3,8        | 0,3        |
| Chuncheon_2   | 3,8        | 0,3        |
| Jeongeup      | 6,4        | 0,2        |

Donde: H/L gradiente modificado.

## Bibliografía

- Agliardi, F, G B Crosta, and P Frattini. 2009. "Integrating Rockfall Risk Assessment and Countermeasure Design by 3D Modelling Techniques." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(4): 1059.
- Agliardi, Federico, Giovanni B Crosta, Andrea Zanchi, and Cesare Ravazzi. 2009. "Onset and Timing of Deep-Seated Gravitational Slope Deformations in the Eastern Alps, Italy." *Geomorphology* 103(1): 113–29.
- Alcántara-Ayala, Irasema. 2002. "Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries." *Geomorphology* 47(2–4): 107–24.
- Alexander, David. 1984. "Building Damage by Landslide: The Case of Ancona, Italy, 1982." *Ekistics*: 452–62.
- Aristizábal, Edier, Hernán Martínez, and Jaime Ignacio Vélez. 2010. "Una Revisión Sobre El Estudio de Movimientos En Masa Detonados Por Lluvias." *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, físicas y Naturales* 34(131): 209–27.
- Ariztizábal, Edier, and Shuichiro Yokota. 2006. "Geomorfología Aplicada a La Ocurrencia de Deslizamientos En El Valle de Aburrá." *Dyna* 73(149): 5–16.
- ASTM. 2007. "ASTM D422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils."
- Augusto Filho, O, L E da S CERRI, and C J Amenomori. 1990. "Riscos Geológicos: Aspectos Conceituais." *Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano* 1: 334–41.
- Bardet, Jean-Pierre. 1997. *Experimental Soil Mechanics*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Bell, R, and T Glade. 2004. "Quantitative Risk Analysis for Landslides—Examples from BÍldudalur, NW-Iceland." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 4(1): 117–31.
- Bizottság, Európai. 2010. *Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management*. Commission Staff Working Paper.
- Borner, Patricio. 1999. *Risikoanalyse Bei Gravitativen Naturgefahren: Methode*. Dokumentationsdienst Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Botero Fernández, Verónica. 2009. "Geo-Information for Measuring Vulnerability to Earthquakes: A Fitness for Use Approach."
- Canuti, Paolo, Nicola Casagli, and Gruppo nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche. 1996. *Considerazioni Sulla Valutazione Del Rischio Di Frana*.
- Capitani, Marco, Adriano Ribolini, and Monica Bini. 2013. "The Slope Aspect: A Predisposing Factor for Landsliding?" *Comptes Rendus Geoscience* 345(11–12): 427–38.
- Cardona, Omar Darío. 1993. "Evaluación de La Amenaza, La Vulnerabilidad y El Riesgo." *En: A. Maskrey (ed.) Los desastres no son naturales*: 51–74.
- CEPAL, N U. 2013. *Valoración de Daños y Pérdidas: Ola Invernal En Colombia 2010-2011*. CEPAL.
- Cerri, L E da S, and C P do Amaral. 1998. "Riscos Geológicos." *OLIVEIRA, AMS & BRITO, SNA (eds.)*: 303–10.
- Colombiano, Servicio Geológico. 2015. "Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza,

- Vulnerabilidad y Riesgo Por Movimientos En Masa.” *Bogotá, DC, Colombia*.
- Corominas, J et al. 2014. “Recommendations for the Quantitative Analysis of Landslide Risk.” *Bulletin of engineering geology and the environment* 73(2): 209–63.
- Crosta, G B, and P Frattini. 2003. “Distributed Modelling of Shallow Landslides Triggered by Intense Rainfall.” *Natural Hazards and Earth System Science* 3(1/2): 81–93.
- Crozier, M J. 1984. “Field Assessment of Slope Instability.” *Slope instability*: 103–42.
- Crozier, M J, and T Glade. 1999. “Frequency and Magnitude of Landsliding: Fundamental Research Issues.” *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Volumes*: 141–55.
- Crozier, Michael J, Thomas Glade, and Malcom Anderson. 2005. *Landslide Hazard and Risk*. Wiley.
- Cruden, David M. 1991. “A Simple Definition of a Landslide.” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 43(1): 27–29.
- Cruden, David M, and David J Varnes. 1996. “Landslides: Investigation and Mitigation.”
- Dai, F C, C F Lee, and Y Yip Ngai. 2002. “Landslide Risk Assessment and Management: An Overview.” *Engineering geology* 64(1): 65–87.
- Doornkamp, John C, and Ronald Ururwick Cooke. 1974. *Geomorphology in Environmental Management: An Introduction*. Clarendon Press.
- Du, J, K Yin, F Nadim, and S Lacasse. 2013. “Quantitative Vulnerability Estimation for Individual Landslides.” In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, , 2181–84*.
- “Ducasse Industrial S.A. - Sistemas Corredizos Para La Industria Del Mueble y La Construcción.” <http://www.ducasseindustrial.com/riel-embutidocx.html> (July 26, 2019).
- Einstein, H H. 1988. “Landslide Risk Assessment Procedure.” In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, , 1075–90*.
- Ernst, W G. 2001. “The Increasing Severity of Circumpacific Natural Disasters.” *International Geology Review* 43(5): 380–90.
- Fell, R, Ken K S Ho, S Lacasse, and E Leroi. 2005. “A Framework for Landslide Risk Assessment and Management.” In *Landslide Risk Management*, CRC Press, 13–36.
- Fell, Robin. 1994. “Landslide Risk Assessment and Acceptable Risk.” *Canadian Geotechnical Journal* 31(2): 261–72.
- . 2008. “Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land-Use Planning.” *Engineering Geology* 102(3–4): 99–111.
- Finlay, P J. 1996. “The Risk Assessment of Slopes. School of Civil Engineering, University of New South Wales, Australia.”
- Fotopoulou, S D, and K D Pitilakis. 2013a. “Fragility Curves for Reinforced Concrete Buildings to Seismically Triggered Slow-Moving Slides.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 48: 143–61.
- . 2013b. “Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Buildings Subjected to Seismically Triggered Slow-Moving Earth Slides.” *Landslides* 10(5): 563–82.
- Fuchs, S. 2008. “Vulnerability to Torrent Events—Empirical Evidence from Austria.” In *Geophys Res Abstr, , 4632*.
- Fuchs, S, K Heiss, and J Hübl. 2007. “Towards an Empirical Vulnerability Function for Use in Debris Flow Risk Assessment.” *Natural Hazards and Earth System Science* 7(5): 495–506.
- Gabor, Tom, and Terri K Griffith. 1980. “The Assessment of Community Vulnerability to Acute Hazardous Materials Incidents.” *Journal of Hazardous Materials* 3(4): 323–33.
- Gemma, Grupo. 2007. “Movimientos En Masa En La Región Andina: Una Guía Para La Evaluación de Amenazas.” *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas, Canadá*.
- GEO. 2006. *Assessment of Landslide Risk in Natural Hillside in Hong Kong*. Hong Kong. Hong Kong: Report no. 191.
- Glade, Thomas, and Michael J Crozier. 2005. “The Nature of Landslide Hazard Impact.” *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester: 43–74.
- Group, Australian Geomechanics Society Landslide Zoning Working. 2007. “Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning.” *Australian geomechanics* 42(1): 13–36.



- Guidicini, Guido, and Carlos Manoel Nieble. 1976. *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. Editora Edgard Blücher.
- . 1984. “Estabilidadde de Taludes Naturais e Esvacao.” 2: 194.
- Guimaraes-Silva, M T M. 2015. “Avaliação Quantitativa Da Vulnerabilidade de Edificações Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas.”
- Haugen, E D, and A M Kaynia. 2008. “Vulnerability of Structures Impacted by Debris Flow.” *Landslides and engineered slopes*. Taylor & Francis, London: 381–87.
- Hermelín, Michel. 2005. *Desastres de Origen Natural En Colombia, 1979-2004*. Universidad Eafit.
- Highland, Lynn, and Peter T Bobrowsky. 2008. *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*. GFD/RR/Worl. Virginia: US Geological Survey Reston.
- Hu, K H, P Cui, and J Q Zhang. 2012. “Characteristics of Damage to Buildings by Debris Flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(7): 2209.
- Hutchinson, J N. 1988. “Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology.” In *Proc., Fifth International Symposium on Landslides, 1988*, Lausanne, AA.
- . 1995. “Landslide Hazard Assessment.” *Landslides*: 1805–41.
- ISDR, U N. 2009. “UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction.” *Geneva, Switzerland, May*.
- ISSMGE, TC32. 2004. “Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms-Version 1.”
- Jaiswal, P, C J Van Westen, and V Jetten. 2011. “Quantitative Estimation of Landslide Risk from Rapid Debris Slides on Natural Slopes in the Nilgiri Hills, India.” *Natural hazards and earth system sciences* 11(6): 1723–43.
- Jakob, M. 2012. “The Fallacy of Frequency. Statistical Techniques for Debris Flow Frequency Magnitude Analysis.” In *Proceedings of the International Landslide Conference, Banff, Canada*, , 2–8.
- Jiménez, J. 2005. “Análisis de La Susceptibilidad a Los Movimientos de Ladera Mediante SIG En La Cuenca Vertiente Al Embalse Ruales, Granada.” *Memoria de Doctorado. Departamento de Ingeniería Civil Área de Ingeniería del Terreno. Universidad de Granada*.
- Juárez-Badillo, E. 2010. “Theoretical Geoscience.” *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica AC, Tlalpan, Mexico*.
- Kang, Hyo-sub, and Yun-tae Kim. 2016. “The Physical Vulnerability of Different Types of Building Structure to Debris Flow Events.” *Natural Hazards* 80(3): 1475–93.
- Kates, Robert W. 1980. “Climate and Society: Lessons from Recent Events.” *Weather* 35(1): 17–25.
- Kaynia, A M et al. 2008. “Probabilistic Assessment of Vulnerability to Landslide: Application to the Village of Lichtenstein, Baden-Württemberg, Germany.” *Engineering Geology* 101(1–2): 33–48.
- “KIT DE ACCESORIOS AMAZONAS - Madecentro.”  
<https://www.madecentro.com/aluminios/aluminios-accesoriossistemas-corredizos/kit-de-accesorios-amazonas.html> (July 23, 2019).
- Lacasse, Suzanne et al. 2008. “Event Tree Analysis of Aknes Rock Slide Hazard.” In *4th Canadian Conf on Geohazards, Quebec City, Canada*, , 20–24.
- Lateltin, O. 1997. “Prise En Compte Des Dangers Dus Aux Mouvements de Terrain Dans Le Cadre Des Activités de l’aménagement Du Territoire.” *Recommandations, OFEFP* 42.
- Leone, F, J P Asté, and E Leroi. 1996. “Vulnerability Assessment of Elements Exposed to Mass-Movement: Working toward a Better Risk Perception.” *Landslides-Glislements de Terrain. Balkema, Rotterdam*: 263–70.
- Levillain, Jean-Pierre. 1987. “Les Risques Hydrauliques: Inondations, Érosions, Affouillements.” *Bulletin de liaison des labo*: 155–68.
- Li, Zhihong et al. 2010. “Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards.” *Landslides* 7(2): 125–34.
- MartínezCarvajal, Hernán Eduardo et al. 2018. “A Mathematical Approach for Assessing Landslide

- Vulnerability.” *Earth Sciences Research Journal* 22(4): 251–73.
- Mavrouli, O, and J Corominas. 2010. “Rockfall Vulnerability Assessment for Reinforced Concrete Buildings.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(10): 2055–66.
- Mavrouli, Olga, and Jordi Corominas. 2010. “Vulnerability of Simple Reinforced Concrete Buildings to Damage by Rockfalls.” *Landslides* 7(2): 169–80.
- Michael-Leiba, Marion, Fred Baynes, Greg Scott, and Ken Granger. 2003. “Regional Landslide Risk to the Cairns Community.” *Natural hazards* 30(2): 233–49.
- Mitchell, James K. 1989. *Hazards Research*. Geography. Columbus: Merrill Publishing Company.
- Nadim, Farrokh, and Oddvar Kjekstad. 2009. “Assessment of Global High-Risk Landslide Disaster Hotspots.” In *Landslides—Disaster Risk Reduction*, Springer, 213–21.
- Negulescu, Caterina, and Evelyne Foerster. 2010. “Parametric Studies and Quantitative Assessment of the Vulnerability of a RC Frame Building Exposed to Differential Settlements.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(9): 1781–92.
- Nielson, Bryant G, and Reginald DesRoches. 2007. “Analytical Seismic Fragility Curves for Typical Bridges in the Central and Southeastern United States.” *Earthquake Spectra* 23(3): 615–33.
- Nogueira, Fernando Rocha. 2002. “Gerenciamento de Riscos Ambientais Associados a Escorregamentos: Contribuição Às Políticas Públicas Municipais Para Áreas de Ocupação Subnormal.”
- Orellana, Cristian Alexander Mundo et al. “Conservación Del Momento Lineal.”
- Papathoma-Koehle, Maria, Margreth Keiler, Reinhold Totschnig, and Thomas Glade. 2012. “Improvement of Vulnerability Curves Using Data from Extreme Events: Debris Flow Event in South Tyrol.” *Natural Hazards* 64(3): 2083–2105.
- Papathoma-Köhle, Maria et al. 2015. “Loss Estimation for Landslides in Mountain Areas—An Integrated Toolbox for Vulnerability Assessment and Damage Documentation.” *Environmental Modelling & Software* 63: 156–69.
- Pichardo, Y. 2004. “Análisis de Vulnerabilidad a Deslizamientos En El Distrito de Orosi, Provincia de Cartago, Costa Rica.”
- Planeacion, Departamento Nacional de. 2015. “3.181 Muertos y 12,3 Millones de Afectados: Las Cifras de Desastres Naturales Entre 2006 y 2014.” DNP. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014.aspx> (August 20, 2018).
- Polanco, Camilo, and Geovany Bedoya. 1979. “Inventario Histórico y Análisis de Los Desastres de Origen Natural Del Departamento de Antioquia Entre 1920 y 2004.” *Desastres de origen natural en Colombia* 2004: 225–37.
- Quan Luna, B et al. 2011. “The Application of Numerical Debris Flow Modelling for the Generation of Physical Vulnerability Curves.” *Natural hazards and earth system sciences* 11(7): 2047–60.
- Republica, Congreso de la. 2012. “Ley 1523.” *Por el cual se adopta la política nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial de la República de Colombia, Bogotá.*
- Rojahn, Christopher, and Roland L Sharpe. 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data for California*. Applied technology council.
- Romang, Hans. 2004. *Wirksamkeit Und Kosten von Wildbach-Schutzmassnahmen*. Geographisches Institut der Universität Bern.
- Schuster, Robert L. 1996. *LANDSLIDES: INVESTIGATION AND MITIGATION. CHAPTER 2- SOCIOECONOMIC SIGNIFICANCE OF LANDSLIDES*.
- Sharpe, C F. 1938. “Landslides and Related Phenomena.”
- Susman, Paul, Phil O’Keefe, and Ben Wisner. 1983. “Global Disasters: A Radical Interpretation. In, Ken Hewitt (Ed.), *Interpretations of Calamity*.”
- Tapsell, Sue, Simon McCarthy, Hazel Faulkner, and Meghan Alexander. 2010. “Social Vulnerability to Natural Hazards.” *State of the art report from CapHaz-Net’s WP4*. London.
- Timmerman, Peter. 1981. *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications*. Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

- 
- Tominaga, Lídia Keiko, Jair Santoro, and Rosangela Amaral. 2009. "Desastres Naturais." *São Paulo: Ed. Instituto Geológico*.
- Uzielli, Marco, Farrokh Nadim, Suzanne Lacasse, and Amir M Kaynia. 2008. "A Conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides." *Engineering Geology* 102(3–4): 251–56.
- Varnes, David J. 1978. "Slope Movement Types and Processes." *Special report* 176: 11–33.
- . 1984. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*.
- Wang, Gonghui, and Kyoji Sassa. 2003. "Pore-Pressure Generation and Movement of Rainfall-Induced Landslides: Effects of Grain Size and Fine-Particle Content." *Engineering geology* 69(1–2): 109–25.
- Westen, C J, and S Greiving. 2017. "Environmental Hazards Methodologies for Risk Assessment and Management." In , 33–92.
- Van Westen, C J, Th W J Van Asch, and Robert Soeters. 2006. "Landslide Hazard and Risk Zonation—Why Is It Still so Difficult?" *Bulletin of Engineering geology and the Environment* 65(2): 167–84.
- Winter, M G et al. 2014. "An Expert Judgement Approach to Determining the Physical Vulnerability of Roads to Debris Flow." *Bulletin of engineering geology and the environment* 73(2): 291–305.
- Wong, H N, K K S Ho, and Y C Chan. 2018. "Assessment of Consequence of Landslides." In *Landslide Risk Assessment*, Routledge, 111–49.
- Zanchetta, Giovanni et al. 2004. "Characteristics of May 5–6, 1998 Volcaniclastic Debris Flows in the Sarno Area (Campania, Southern Italy): Relationships to Structural Damage and Hazard Zonation." *Journal of volcanology and geothermal research* 133(1–4): 377–93.
- ZUQUETTE, Lázaro V. 1993. "Importância Do Mapeamento Geotécnico No Uso e Ocupação Do Meio Físico: Fundamentos e Guia Para Elaboração." *São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos*.
- Zuquette, Lázaro Valentim, Osni José Pejon, Nilson Gandolfi, and Antenor Braga Paraguassu. 1995. "Considerações Básicas Sobre a Elaboração de Cartas de Zoneamentos de Probabilidade Ou Possibilidade de Ocorrer Eventos Perigosos e de Riscos Associados." *Geociências* 14(2): 9–39.