

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL

P. patrocinante: Carmen González Labbé.

P. comisión: Pedro Cisternas O.

Álvaro Suazo S.

***“Identificación y medición de variables críticas para la determinación de un umbral físico de deslizamiento en la autopista del Itata”***

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil

PABLO ESTEBAN GONZÁLEZ AVILÉS.

Concepción, Junio de 2017

Agradecer a todos mis familiares que me acompañaron durante todo mi proceso universitario, sobre todo a mis padres y hermanos quienes confiaron en mi, me apoyaron en los peores momentos y me alentaron para poder terminar este proceso.

A mi grupo de amigos de la universidad, Cristian, Ricardo, Felipe Inzunza, Rodrigo, Shico Mark, Felipe Toledo, Ignacio y Martín por toda la ayuda y grandes momentos compartidos a lo largo de toda esta experiencia universitaria.

A los docentes de la facultad de Ingeniería Civil, en especial a la profesora Carmen González y Miguel Orellana

Por último agradecer a los encargados de laboratorio de la Universidad Católica y la Universidad de Concepción por ayudarme el desarrollo de esta investigación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	6
RESUMEN.....	7
SUMMARY .....	8
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
Objetivo General.....	9
Objetivos Específicos.....	9
CAPÍTULO II: MODELO UTILIZADO Y TEORÍA BÁSICA .....	10
Efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes homogéneos. D.Pradel y G.Raad, 1993. ....	10
Modelo de Green-Ampt.....	14
Conceptos básicos dentro del modelo de D.Pradel.....	16
Precipitaciones .....	16
Humedad superficial .....	17
Infiltración .....	17
Frente húmedo .....	18
Succión .....	18
Succión matricial.....	18
Capilaridad.....	19
Adsorción.....	19
Porosidad .....	21
Permeabilidad .....	22

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....	23
Caracterización del suelo.....	24
Parámetros del modelo .....	24
Porosidad .....	24
Permeabilidad .....	25
Succión .....	26
Profundidad del frente húmedo.....	27
Precipitaciones .....	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	29
Desarrollo del modelo .....	29
Obtención de intensidad límite .....	29
Obtención de permeabilidad límite .....	34
Influencia de la porosidad del suelo, succión y profundidad del frente húmedo en la obtención del umbral por precipitación.....	37
Porosidad del suelo .....	37
Profundidad del frente húmedo.....	39
Succión .....	40
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43
Conclusiones.....	43
Recomendaciones .....	44
BIBLIOGRAFÍA .....	46
ANEXOS.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sección transversal que muestra el área húmeda por lluvia o riego .....	11
<b>Figura 2:</b> Intensidad de lluvia capaz de crear la condición de saturación a una profundidad $Z_w$ .....	12
<b>Figura 3:</b> Duración mínima v/s precipitación máxima para distintos periodos de retorno .....	13
<b>Figura 4:</b> Esquemmatización del modelo de Green-Ampt .....	16
<b>Figura 5:</b> Esquema del medio poroso en el suelo .....	19
<b>Figura 6:</b> Fenómeno de adsorción en partículas sólidas .....	20
<b>Figura 7:</b> Relación entre succión y resistencia al corte en suelos .....	21
<b>Figura 8:</b> Parámetros de infiltración del modelo Green-Ampt.....	26
<b>Figura 9:</b> Curvas IDF-Concepción.....	27
<b>Figura 10:</b> Curvas IDF correspondientes a Concepción .....	28
<b>Figura 11:</b> Intersección curvas IDF e intensidad mínima .....	28
<b>Figura 12:</b> Intersección curva $I_{min}$ y curvas IDF, con $Z_w= 50$ cm .....	29
<b>Figura 13:</b> Intersección curva $I_{min}$ y curvas IDF, con $Z_w= 30$ cm.....	30
<b>Figura 14:</b> Duraciones e intensidades límite $Z_w= 10$ cm.....	31
<b>Figura 15:</b> Permeabilidades límite para distintos periodos de retorno $Z_w= 30$ cm.....	34
<b>Figura 16:</b> Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno $Z_w= 50$ cm .....	33
<b>Figura 17:</b> Variación del umbral de precipitaciones al modificar porosidad (manteniendo succión y profundidad del frente húmedo constante) .....	37
<b>Figura 18:</b> Variación en el umbral de precipitación modificando profundidad del frente húmedo (con succión y profundidad del frente húmedo constante) .....	38
<b>Figura 19:</b> Variación en el umbral de precipitación modificando succión en el frente húmedo (con porosidad y profundidad constantes) .....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Valores de porosidad para cada uno de los sectores de muestreo .....	24
<b>Tabla 2:</b> Duraciones e intensidades límite con $Z_w= 50\text{cm}$ .....	30
<b>Tabla 3:</b> Duraciones e intensidades límite $Z_w= 30\text{ cm}$ .....	31
<b>Tabla 4:</b> Duraciones e instensidades límite con $Z_w= 10\text{ cm}$ . .....	32
<b>Tabla 5:</b> Valores de permeabilidad mediante método Porchet y permeámetro C.V.....	35
<b>Tabla 6:</b> Valores de precipitación total para distintos valores de porosidad, con succión y profundidad del frente húmedo constante .....	37
<b>Tabla 7:</b> Precipitación total para distintos valores de profundidad del frente húmedo, considerando succion y porosidad constante.....	38
<b>Tabla 8:</b> Valores de precipitación total caídos dentro de las primeras 24 horas .....	41

# **IDENTIFICACIÓN Y MEDICIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE UN UMBRAL FÍSICO DE DESLIZAMIENTO EN LA AUTOPISTA DEL ITATA**

Autor: Pablo Esteban González Avilés

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Biobío

Correo Electrónico: [pgonzala@alumnos.ubiobio.cl](mailto:pgonzala@alumnos.ubiobio.cl)

Profesor Patrocinante: Carmen González Labbé

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Biobío

Correo Electrónico: [cgonzal@ubiobio.cl](mailto:cgonzal@ubiobio.cl)

## **RESUMEN**

La inestabilidad de taludes ha generado gran atención en los últimos años debido a los altos costos económicos e incluso numerosas pérdidas humanas. Las fallas más frecuentes son las causadas por precipitaciones, las cuales generan un aumento en la presión de poros dentro del talud lo cual se traduce en una disminución de la resistencia al corte generándose así el deslizamiento. La primera etapa de esta investigación se enfocó en el estudio y selección de un modelo para predecir deslizamientos junto con las variables físicas involucradas. Posteriormente se desarrolló una serie de ensayos de laboratorio y/o in situ para obtener las variables necesarias para el desarrollo del modelo. Finalmente se aplicaron estas variables con la idea de reflejar las condiciones que generarían una falla por precipitaciones en un talud real de la región del Biobío a fin de obtener un umbral por precipitaciones para la Autopista del Itata.

Palabras clave: Talud urbano, Precipitaciones, Permeabilidad, Infiltración, deslizamientos.

**IDENTIFICATION AND MEASUREMENT OF THE CRITICAL VARIABLES  
FOR THE DETERMINATION OF A PHYSICAL THRESHOLD SLIDE AT THE  
ITATA HIGHWAY**

Author: Pablo Esteban González Avilés

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Biobío

E-mail: [pgonzala@alumnos.ubiobio.cl](mailto:pgonzala@alumnos.ubiobio.cl)

Sponsoring Professor: Carmen González Labbé

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Biobío

E-mail: [cgonzal@ubiobio.cl](mailto:cgonzal@ubiobio.cl)

**SUMMARY**

The instability of slopes has generated great attention in the last years due to the high economic costs and even numerous human losses. The most frequent faults are those caused by precipitation, which generate an increase in the pore pressure within the slope which results in a decrease in the shear strength resulting in sliding. The first stage of this research focused on the study and selection of a model to predict landslides along with the physical variables involved. Subsequently a series of laboratory and / or in situ tests were developed to obtain the necessary variables for the development of the model. Finally, these variables were applied with the idea of reflecting the conditions that would generate a failure by precipitation in a real slope of the Biobío region in order to obtain a precipitation threshold for the Itata Highway.

Keywords: Urban slope, Precipitation, Permeability, Infiltration, landslides.



## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

En Chile el deslizamiento superficial de taludes es un problema que se ha producido durante muchos años, lo cual conlleva pérdidas económicas y en casos más extremos pérdidas humanas, además de registrar numerosas catástrofes a nivel mundial. Uno de los principales factores detonantes de deslizamientos superficiales son las precipitaciones y es por esto que diversos investigadores han estudiado durante años las causas y efectos de este problema, con el fin de comprender estos fenómenos y de esta forma solucionar los problemas de inestabilidad en taludes. Específicamente en la región del Biobío estas precipitaciones alcanzan volúmenes elevados que son del orden de 1100 mm anuales de acuerdo a registros entregados por la dirección meteorológica de Chile, lo cual hace necesario un estudio en relación al efecto de estas precipitaciones sobre los taludes de esta región. Estudios anteriores han demostrado el gran efecto erosivo que han producido las precipitaciones en taludes presentes en la región del Biobío, afectando incluso sobre un 90% de la superficie de estos. Por ello el presente estudio tiene por objetivo elaborar una propuesta de umbral físico por deslizamiento para la ruta del Itata mediante la caracterización y medición de las variables involucradas en el modelo a través de ensayos de laboratorio y/o in situ, y de esta forma proponer un umbral físico por precipitaciones para la zona de estudio.

### **Objetivo General**

- Elaborar una propuesta de umbral físico para la ruta del Itata.

### **Objetivos Específicos**

- Seleccionar un modelo físico para predecir deslizamientos de suelo debido a precipitaciones.
- Caracterizar el terreno y medir las variables involucradas en el modelo a partir del suelo predominante en la autopista del Itata.
- Proponer un umbral físico para la autopista del Itata en base al modelo seleccionado

## **CAPÍTULO II: MODELO UTILIZADO Y TEORÍA BÁSICA**

En este capítulo se describe el modelo físico utilizado para la elaboración de propuesta de umbral físico por precipitación en la región. Para ello se consideró como antecedente la gran variedad de modelos estudiados por la ex-alumna Constanza Tapia, quien realizó una investigación cuyo nombre es “Estado del arte de los métodos físicos para definir umbrales críticos por lluvia”. En dicha investigación se seleccionó el modelo más apropiado de acuerdo al alcance de investigación, principalmente económico debido a que algunos de los modelos requieren equipos muy especializados para la obtención de las diversas variables involucradas, además del uso de softwares específicos.

**TÍTULO DEL MODELO SELECCIONADO: “Efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes homogéneos.” D.Pradel y G.Raad, 1993.**

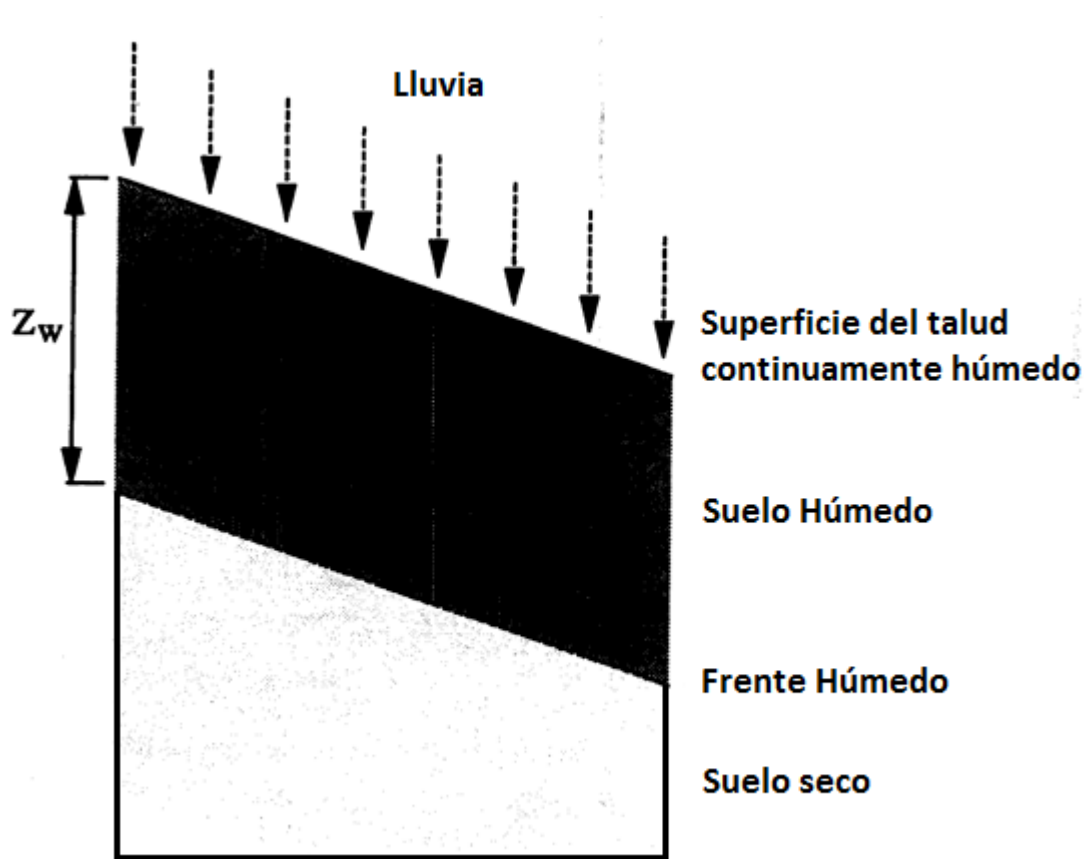
Durante prolongados periodos de lluvia intensa, muchas fallas de taludes han ocurrido en el sur de California, generando daños estructurales en zonas tanto públicas como privadas junto a los elevados gastos económicos que esto conlleva. De acuerdo a los códigos locales, la estabilidad es evaluada asumiendo una infiltración paralela a la cara del talud, lo cual sugiere que este tipo de falla es más común que ocurra en taludes formados por arena y grava en comparación a aquellos formados por suelos cohesivos como limo y arcilla.

Durante lluvias intensas, el agua se filtra dentro del suelo, saturando sus capas superficiales. La presión de poros interna del agua se desarrolla y reduce la resistencia al corte del suelo hasta que este se encuentra con una capa más impermeable a través de la cual se produce el flujo paralelo. Estas condiciones reducen el factor de seguridad del talud y son las responsables de que las fallas se gatillen.

Antes de que el mecanismo de falla mencionado con anterioridad se desarrolle, el suelo debe alcanzar la saturación. Las dos condiciones para alcanzar la saturación son:

- Lluvias suficientemente intensas para exceder la tasa de infiltración del material.
- Lluvias suficientemente largas para saturar el talud a una profundidad  $Z_w$ .

Por simplicidad se asume que el material de la superficie es originalmente insaturado y la superficie del talud es continuamente mojada por lluvia, como se puede observar en la **Figura 1**.



**Figura 1: Sección transversal que muestra el área húmeda por lluvia o riego**  
 [Fuente: Pradel y Raad, 1993]

Para ello se adoptó un modelo simple de infiltración basado en la ley de Darcy, el cual fue propuesto por Green-Ampt. De acuerdo a estas condiciones, la intensidad de lluvia  $I$ , debe ser mayor que la tasa de infiltración  $V_i$ , mientras que la segunda condición requiere que las precipitaciones duren más que  $T_w$ . Ambas condiciones llevan a las siguientes desigualdades

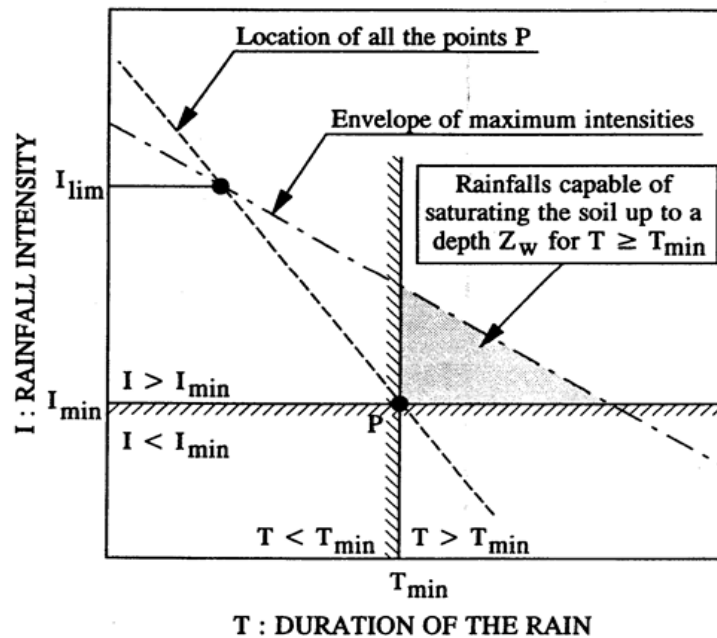
$T \geq T_w$  e  $I \geq V_i$ , las cuales proveen los requerimientos mínimos para saturar el suelo a una profundidad  $Z_w$ .

Aplicando ambas condiciones a las ecuaciones del modelo de Green-Ampt, las cuales se desarrollan con mayor exactitud en [Anexo A], es posible establecer una relación entre la intensidad mínima ( $I_{min}$ ) y la duración de las precipitaciones ( $T_{min}$ ) a través de la siguiente expresión:

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[ z_w + S \cdot \ln \left( \frac{S + z_w}{S} \right) \right] \left( \frac{z_w + S}{z_w} \right) \quad (1)$$

Donde  $\mu$ = porosidad del material,  $S$ = succión capilar del frente húmedo y  $Z_w$ = profundidad del frente húmedo.

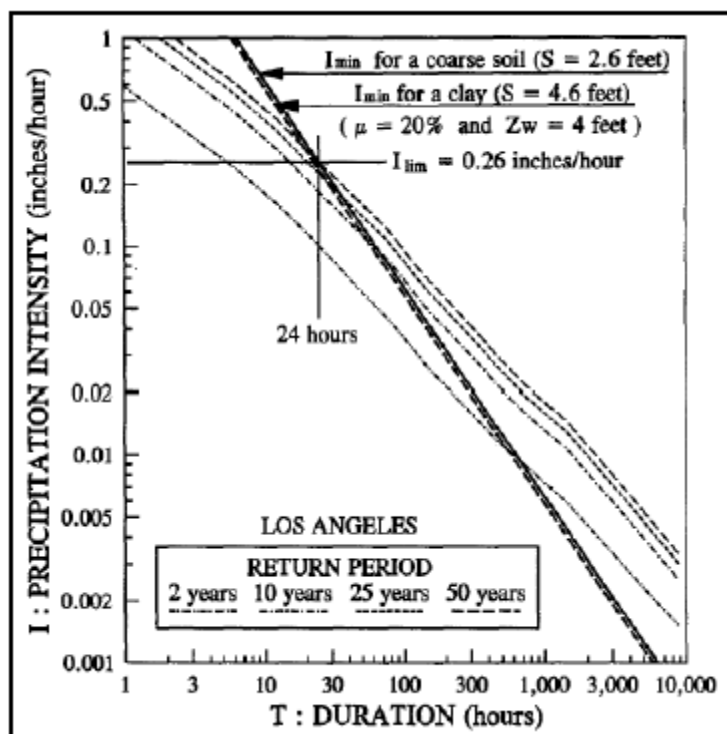
Cabe mencionar que la ecuación antes señalada no considera los efectos de pérdida y evotranspiración, por lo tanto se pueden requerir intensidades de lluvia mucho mayores que ( $I_{min}$ ) para producir saturación.



**Figura 2: Intensidad de lluvia capaz de crear la condición de saturación a una profundidad  $Z_w$  (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)**

Las condiciones para saturación se muestran gráficamente en la **Figura 2**. Se puede apreciar que el punto P, con coordenadas ( $T_{min}$ ,  $I_{min}$ ), se encuentra bajo la curva de máximas intensidades, es decir, no existe lluvia capaz de saturar el suelo a una profundidad  $Z_w$ . El punto de encuentro entre la condición de ( $I_{min}$ ) y la curva de máximas intensidades define el límite de intensidad o precipitaciones ( $I_{lim}$ ) y además el umbral de permeabilidad ( $K_{lim}$ ), el cual representa la máxima permeabilidad que permitirá saturación a una profundidad  $Z_w$ .

El estudio desarrollado por Pradel abarcó cuatro localidades de Estados Unidos: Los Ángeles, Ventura, Orange y San Diego. En la siguiente figura se puede observar de acuerdo a los cálculos obtenidos, la intersección entre las líneas que definen la intensidad de precipitación y la línea que describe el requisito mínimo para la saturación a una profundidad  $Z_w$ , específicamente para suelos presentes en Los Ángeles.



**Figura 3: Duración mínima v/s precipitación máxima para distintos periodos de retorno (Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1993)**

En esta figura se puede observar que para un suelo de grano grueso con  $\mu= 0,2$  y  $Z_w= 1,22$  m, el umbral de precipitación o ( $I_{lim}$ ) para un periodo de retorno de 50 años tendría que durar al menos 24 horas con el fin de saturar dicho suelo a esa profundidad.

La intensidad de precipitación  $I_{lim}= 6,6$  mm/hr además define la permeabilidad límite del suelo para este ejemplo en concreto del orden de  $K_{lim}= 1.1*10^{-4}$ . Utilizando el mismo procedimiento se analizó el resto de las localidades determinando así el umbral por precipitaciones máximas para cada una de ellas.

Pradel además observó que a medida que la permeabilidad límite ( $K_{lim}$ ) disminuye, el periodo de retorno de la precipitación para saturar el suelo también disminuye. En otras palabras cuanto menos es la permeabilidad mayor es la probabilidad de que la saturación se desarrolle en el talud, lo cual hace que materiales finos como limos y arcillas sean más propensos a desarrollar esta condición de inestabilidad superficial en comparación a suelos granulares.

### **Modelo de Green-Ampt**

Para el desarrollo del modelo descrito anteriormente, Pradel se basó en los estudios de Green Ampt, quien estableció un modelo simplificado de infiltración basado en cuatro supuestos descritos a continuación. Supuestos a través de los cuales es posible obtener las ecuaciones de tasa o velocidad de infiltración y tiempo de encharcamiento, ecuaciones que son explicadas con mayor exactitud en el [Anexo A] y que son las expresiones que permiten obtener de manera gráfica la curva de intensidad mínima necesaria para calcular de esta forma el umbral físico por precipitaciones. Es importante mencionar que la única diferencia en cuanto a la aplicación de estos cuatro supuestos esquematizados por medio de la figura 1 y 4, es que la altura de encharcamiento en el modelo de Pradel es igual a cero puesto que esta descende por la cara del talud en forma de escorrentía superficial. Las simplificaciones en las cuales se basa este modelo son las siguientes:

- Suelo homogéneo, con un contenido inicial de agua uniforme.
- Existe un potencial mátrico constante, que no varía a medida que avanza el frente húmedo. Este potencial se encuentra en la zona de transición entre el suelo con humedad inicial antes de la precipitación y la zona saturada superior.
- Coeficiente de permeabilidad (K) constante sobre el frente húmedo, que no varía en el tiempo.
- Existe un encharcamiento constante en la superficie.

En resumen, corresponde a un “pistón” de agua relleno los poros del suelo y succionando hacia abajo con una tensión constante. Desde la superficie hasta la profundidad (L) que alcanza el frente húmedo, junto con el potencial capilar o succión (S) y el potencial gravitacional z que varía de cero a L. Consecuentemente la carga piezométrica h varía de cero a S+L, entre la superficie del terreno y la profundidad del frente húmedo. Sustituyendo esa relación en la ecuación de Darcy, se obtiene entonces la ecuación de Green-Ampt.

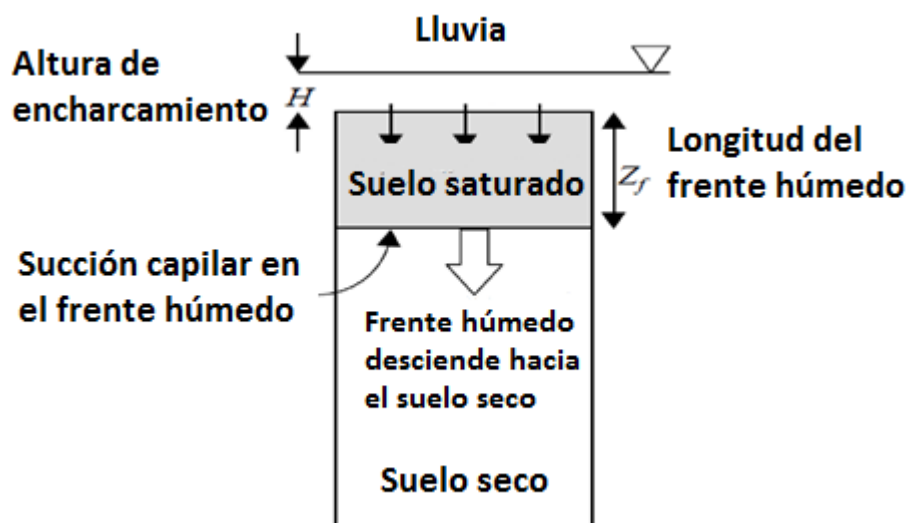
$$v_i = k_w \frac{z_w + S}{z_w} \quad (1)$$

Donde  $v_i$  = Velocidad de infiltración o tasa de infiltración

$K_w$  = Coeficiente de permeabilidad

$Z_w$  = Profundidad del frente húmedo

$S$  = Succión capilar en el frente húmedo



**Figura 4: Esquemización del modelo de Green-Ampt  
(Fuente: Elaboración propia)**

### **Conceptos básicos dentro del modelo de D.Pradel**

#### *Precipitaciones*

Esta es la variable más importante en esta investigación puesto que es la desencadenante específica de las fallas por deslizamiento de suelo.

Corresponde a cualquier forma de agua que cae sobre la superficie terrestre, y desde el punto de vista ingenieril, corresponde al volumen o altura de agua que cae sobre un área en un periodo de tiempo determinado.

Específicamente para el desarrollo de esta investigación se considerarán las precipitaciones a partir de las curvas IDF, las cuales corresponden a una relación entre la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones para distintos periodos de retorno.



### *Humedad superficial*

La humedad superficial es una variable que guarda estricta relación con respecto al porcentaje de precipitaciones infiltradas dentro del talud.

Los factores que afectan la humedad superficial son:

- Características topográficas de la pendiente
- Tipo de suelo
- Características climáticas
- Vegetación existente

### *Infiltración*

El agua que cae sobre la superficie terrestre producto de las precipitaciones queda encharcada, se puede evaporar, escurrir por ella o penetrar hacia el interior de esta. Esta última se define como infiltración y se caracteriza por el paso del agua desde la superficie hacia el interior del suelo. Este proceso depende principalmente del agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo, estado de la superficie y cantidad de agua. Por ejemplo, los suelos arenosos de grano grueso poseen espacios grandes entre cada grano donde permiten que el agua se infiltre rápidamente en comparación a otro suelo de grano fino o cohesivo donde los espacios son más pequeños y de esta forma producen encharcamiento.

A medida que el agua se infiltra desde la superficie, las capas presentes se van humedeciendo desde arriba hacia abajo, lo cual produce una alteración gradual de su humedad, siendo claramente la superficie el primer nivel. Sin embargo, las lluvias no logran saturar todo el suelo, sino que solo las capas más superiores donde el perfil de humedad decrece conforme avanza la profundidad. Algunos de los factores que afectan la infiltración son:

- Condiciones de superficie
- Características del terreno
- Condiciones ambientales
- Intensidad de precipitación
- Cubierta vegetal

*Frente húmedo*

Al infiltrarse el agua se genera el denominado frente húmedo que avanza en sentido vertical, bajo la influencia de la gravedad y de manera paralela a la superficie del terreno. El espesor de este frente húmedo depende de la intensidad y duración de la lluvia, y de la permeabilidad de los materiales. En temporadas con muchos eventos lluviosos los espesores del frente tienden a ser mayores.

*Succión*

La succión es un término muy utilizado para explicar el comportamiento de los suelos no saturados y la presencia de presiones de poros negativas. La succión, según Fredlund (1995), esta compuesta de dos elementos básicos: la succión matricial y la succión osmótica. La suma de ambas se denomina succión total.

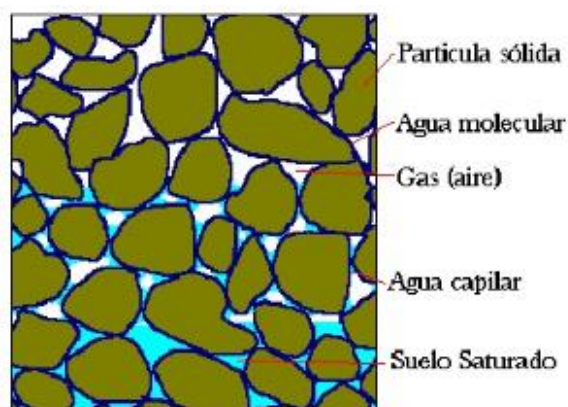
$$S_t = S_m + S_{osm} \quad (2)$$

*Succión matricial*

La succión matricial es un componente de la succión total. Esta asociada a la capilaridad debida a la tensión superficial en la interfase agua-aire y a la adsorción desarrollada en la superficie de las partículas. El valor de la succión matricial depende del tamaño y distribución de las partículas, del tamaño de los poros y del grado de saturación. La saturación afecta la componente de cohesión de acuerdo a los criterios actuales de la mecánica de suelos, es decir, que a medida que avanza el tiempo de lluvia, se va produciendo una disminución en la succión, por lo tanto podemos señalar que a medida que aumenta el grado de saturación del suelo se produce una disminución de la succión en el talud.

## Capilaridad

La capilaridad es un fenómeno físico característico de los líquidos que se estudia con un “tubo capilar”. La capilaridad es el fenómeno que permite que el líquido ascienda dentro del tubo en contra de la gravedad hasta una altura llamada altura capilar. Las fuerzas responsables de la capilaridad son la atracción del agua por superficies sólidas (adhesión) y la tensión superficial del agua, que en gran parte se debe a la atracción entre dos moléculas de agua (cohesión). Al contrario de los tubos capilares, los vacíos en los suelos tienen ancho variable y se comunican entre si formando un enrejado. Si este enrejado se comunica por abajo con el agua, su parte inferior se satura completamente. Más arriba el agua solo ocupa los vacíos pequeños y los mayores quedan con aire.



**Figura 5: Esquema del medio poroso en el suelo (Fuente: es.scribd.com)**

## Adsorción

La atracción por adsorción se origina como consecuencia de que en la superficie de las partículas sólidas existe una descompensación eléctrica. De esta forma las moléculas de agua actúan como dipolos y son atraídas por fuerzas electrostáticas.

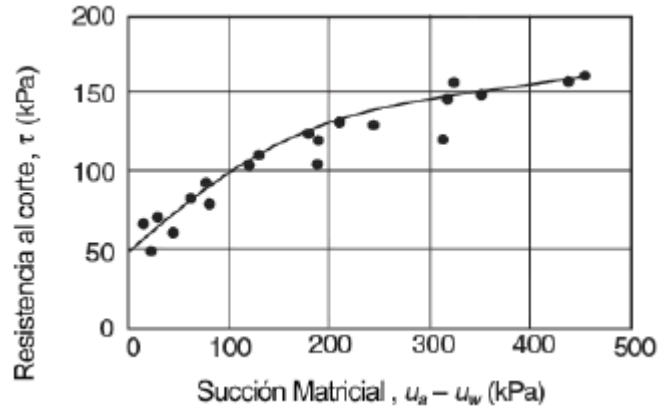


**Figura 6: Fenómeno de adsorción en partículas sólidas**  
(Fuente: edafologia.fcien.edu.uy)

Si el suelo se encuentra solamente húmedo, existen dentro de este resistencias aparentes debido a la presiones de poro negativas que pueden producir un talud estable. Sin embargo, si se produce saturación por infiltración entonces desaparecen, produciéndose así la falla.

Por lo anterior, la mecánica de suelos se ha interesado principalmente en los suelos saturados, ya que, en general, la resistencia y rigidez de los suelos parcialmente saturados son superiores por lo que es conservador suponer, que en cualquier caso, los suelos pueden estar saturados, donde es posible en la mayoría de los casos que se llegue a esta situación.

Por razones prácticas se asumió esta condición como la más crítica; siendo una simplificación para tratar de explicar el comportamiento del terreno en un sistema bifásico (agua-sólido). Un ejemplo claro de ello es el análisis de estabilidad de taludes, donde los modelos empleados para la evaluación de los factores de seguridad consideran la saturación al 100%, siendo esta la condición más conservadora. En cambio, la estabilidad en suelos parcialmente saturados se consigue cuando la disminución de la humedad produce un aumento de la succión generando un incremento inseparable en la resistencia al corte y por ende en los factores de seguridad. Mientras que si se produce un incremento hidrostático, el suelo pierde la succión y su capacidad de resistir las fuerzas que lo desequilibran dando lugar a la falla o rotura.



**Figura 7: Relación entre succión y resistencia al corte en suelos**  
(Fuente: revistas.unal.edu.co)

Como se puede apreciar, a medida que incrementa la succión en el suelo, la resistencia al corte también lo hace, lo cual genera un aumento en el factor de seguridad de un talud y por ende es más estable. Sin embargo, al ser un parámetro que beneficia la estabilidad de los taludes, no se le considera, lo cual hace el modelo más conservador, además de facilitar los cálculos.

### *Porosidad*

Se define como porosidad al espacio del suelo que no está ocupado por sólidos o también como la porción de suelo que está ocupada por aire y/o agua. En suelos secos los poros están ocupados por aire, mientras que en suelos saturados lo están por agua.

Los factores que determinan la porosidad son:

- Textura del suelo
- Estructura del suelo
- Cantidad de materia orgánica presente

Esta variable posee una importancia especial debido a que constituye el medio por el cual el agua penetra al suelo, puesto que la tasa de movimiento del agua y del aire es determinada en gran medida por el tamaño de los poros.

### *Permeabilidad*

La permeabilidad es la capacidad de un cuerpo, en este caso el suelo, para permitir el paso de un fluido (agua), sin que dicho tránsito afecte la estructura interna del suelo. Este concepto de permeabilidad también recibe el nombre de conductividad o transmisividad hidráulica. Dependiendo del contexto en el cual es empleado, existen diversos factores que influyen en el coeficiente de permeabilidad, entre los cuales se encuentran:

- Relación de vacíos
- Temperatura del agua
- Estructura y estratificación
- Agujeros y fisuras
- Tamaño de partículas
- Gradación del suelo

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

En este capítulo se expondrá la etapa experimental de esta investigación, describiendo cada una de sus partes con el fin de lograr el objetivo principal de determinar el umbral por precipitaciones para un talud real en la Autopista del Itata.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó un talud ubicado en la Autopista del Itata, específicamente en el km. 71.8. La elección de este talud en particular se basa en estudios realizados por la ex-alumna Claudia Mardones, quien estudió el efecto de las precipitaciones sobre diversos taludes viales en la provincia de Concepción, trabajo que lleva como nombre “Catastro a taludes viales de la provincia de Concepción”, donde se puede concluir que dicha ruta es la mas afectada por la erosión debido a precipitaciones.

En cuanto a la elección del km. 71.8, se decidió abordar este sector tras conversaciones con la concesionaria encargada de la ruta, quienes señalaron que ese sector era específicamente el único que presentaba en ocasiones puntuales pequeños deslizamientos de suelo. Del estudio bibliográfico anterior, las variables involucradas dentro del modelo de D.Pradel son presentadas a continuación, describiendo el ensayo o metodología correspondiente para su obtención.

Finalmente para completar la investigación, se deberá calcular el umbral de intensidad de precipitaciones siguiendo el modelo de D.Pradel, el cual asegura la condición de saturación total del suelo gatillando así el deslizamiento de este.

A fin de obtener el umbral por precipitaciones para la Autopista del Itata se inició la etapa experimental de esta investigación de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Visita a terreno para seleccionar el sector de muestreo a partir del cual se obtendrán las muestras de suelo necesarias para los distintos ensayos de laboratorio o in situ necesarios.
2. Identificación de las variables físicas del suelo necesarias para el cálculo de umbral por precipitaciones junto con la revisión de distintos tipos de ensayo a aplicar.

3. Caracterización del sector de estudio junto a la recopilación de antecedentes mediante ensayos básicos de mecánica de suelos, principalmente para determinar su clasificación de acuerdo a la USCS.
4. Descripción de las variables utilizadas junto con el ensayo de laboratorio y/o metodología seleccionada y posteriormente la aplicación de estos para su obtención.
5. Aplicar el modelo escogido a partir de los resultados obtenidos en los distintos ensayos y así proponer el umbral físico por precipitaciones para la Autopista del Itata.

### **Caracterización del suelo**

El material utilizado para esta experiencia fue extraído de la zona específica del talud antes mencionado, donde se retiraron muestras de suelo en 3 puntos específicos dentro de una longitud de 15 metros y a distintas profundidades. Todas las muestras se obtuvieron a partir de calicatas, donde se introdujo una cuchara bi-partida fabricada para dichos fines. Para la correcta caracterización de cada uno de los puntos de muestreo se realizaron los ensayos de clasificación, límites de atterberg, humedad y granulometría correspondientes. Siguiendo todas las normas correspondientes para la clasificación USCS, se determinó que el suelo de estudio corresponde a una arena limosa. “SM”. [Anexo B].

Todos los ensayos relacionados con la caracterización de suelo se realizaron en el laboratorio de Ingeniería Civil de la universidad del Bío-Bío.

### **Parámetros del modelo**

De acuerdo al estudio de D.Pradel los parámetros físicos del suelo utilizados para los cálculos, de acuerdo al modelo son:

#### *Porosidad*

Para obtener esta variable se calculó la densidad real y densidad aparente de suelo. La densidad real se obtuvo mediante un ensayo de laboratorio en el cual se utilizó un picnómetro.



Los valores de densidad real para los suelos minerales más comunes oscilan entre los 2,5 a 2,7 Kg/m<sup>3</sup>.

La densidad aparente del suelo fue obtenida mediante el cono de arena en el cual se realizó una medición para cada calicata estudiada. Los valores típicos de densidad aparente oscilan entre los 1.1 y los 1.9 Kg/m<sup>3</sup>.

Luego de obtener ambas variables es posible calcular el valor de porosidad a través de la siguiente expresión.

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{d_r - d_a}{d_a} \times 100 \quad (3)$$

De acuerdo a los a resultados obtenidos las porosidades correspondientes para cada una de las muestras de suelo son las siguientes:

	D.real (Kg/cm3)	D.aparente (Kg/cm3)	Porosidad (%)
C1	2,73	1,56	42
C2	2,73	1,53	44
C3	2,73	1,55	43

**Tabla 1: Valores de porosidad para cada uno de los sectores de muestreo**  
(Fuente: Elaboración propia)

Los cálculos más detallados acerca de la obtención de este parámetro se encuentran en el **[Anexo B]**

### *Permeabilidad*

Este parámetro se puede obtener a través de distintos métodos o ensayos de laboratorio. El más conocido de ellos es el método “Porchet”, sin embargo existen otros métodos más específicos que utilizan equipos denominados permeámetros. Entre los cuales destaca el permeámetro de carga constante y carga variable.

El permeámetro de carga constante se utiliza en suelos de tipo granular que poseen hasta un 10% de material fino. Sobre un 10% se procede a utilizar el permeámetro de carga variable. A partir de la granulometría en los tres puntos de muestreo se determinó que estos presentaban sobre un 30% de material fino, por lo tanto en el desarrollo de esta investigación se utilizó el permeámetro de carga variable.

Además se aplicó el método “Porchet” in situ para obtener de manera indirecta la permeabilidad del suelo. Este método se aplica en condiciones naturales donde el terreno presenta vegetación y raíces que facilitan el paso de las precipitaciones, además de pequeñas “fisuras” o caminos donde pueden fluir más rápidamente a diferencia de las muestras remoldeadas (permeámetro) donde lo anteriormente descrito no ocurre.

Lo anterior implica variaciones en los resultados obtenidos comparando la aplicación de ambos métodos en el mismo tipo de suelo.

Todo el desarrollo acerca del método Porchet y el permeámetro de carga variable se encuentra en el **[Anexo B]**

### *Succión*

Debido a la complejidad para la obtención de este parámetro y la necesidad de utilizar equipos especializados para su obtención se optó por utilizar valores extraídos de referencias bibliográficas.

De acuerdo al modelo de estudio abordado los valores para distintos tipos de suelos varían de acuerdo a la siguiente Tabla.

USDA Soil Texture Classification	SUCT Avg. Capillary Suction		HYDCON Saturated Hydraulic Conductivity		SMDMAX Initial Moisture Deficit for Soil (Vol. of Air / Vol. of Voids, expressed as a fraction)	
	(in)	(mm)	(in/hr)	(mm/hr)	Moist Soil Climates (Eastern US)	Dry Soil Climates (Western US)
Sand	1.95	49.5	9.27	235.6	.346	.404
Loamy Sand	2.41	61.3	2.35	59.8	.312	.382
Sandy Loam	4.33	110.1	0.86	21.8	.246	.358
Loam	3.50	88.9	0.52	13.2	.193	.346
Silt Loam	6.57	166.8	0.27	6.8	.171	.368
Sandy Clay Loam	8.60	218.5	0.12	3.0	.143	.250
Clay Loam	8.22	208.8	0.08	2.0	.146	.267
Silty Clay Loam	10.75	273.0	0.08	2.0	.105	.263
Sandy Clay	9.41	239.0	0.05	1.2	.091	.191
Silty Clay	11.50	292.2	0.04	1.0	.092	.229
Clay	12.45	316.3	0.02	0.6	.079	.203

**Figura 8: Parámetros de infiltración del modelo Green-Ampt**  
(Fuente: <http://www.water-research.net/Waterlibrary/Stormwater/greenamp.pdf>)

Se debe considerar que estos valores corresponden a un promedio de los diversos valores obtenidos en numerosos ensayos de laboratorio.

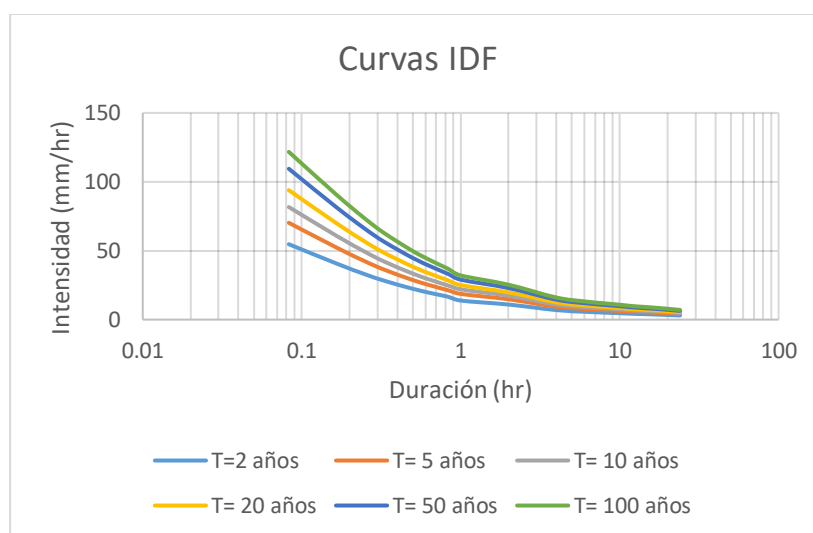
#### *Profundidad del frente húmedo*

El modelo de D.Pradel considera la presencia del frente húmedo a una profundidad de 1.22 m. Sin embargo, el Ex-alumno Luis Rivas realizó la investigación “Análisis del frente húmedo en talud real, a través de muestreo con equipo de penetración dinámica” en la cual concluyó que la profundidad del frente húmedo en un talud de nuestra región se encontraba entre los 50 y 70 centímetros, haciendo uso de un método gravimétrico. En esta investigación se aplicara el modelo en profundidades de 10, 30 y 50 cm a fin de estudiar el comportamiento del suelo en otras profundidades.

### Precipitaciones

Con el fin de caracterizar el régimen de precipitaciones de la provincia de Concepción se procedió a construir curvas IDF, basándose en datos extraídos de registros del MINVU. Se construyeron curvas para 2,5,10,20,50 y 100 años de periodo de retorno, abarcando duraciones desde los 5 minutos hasta las 24 horas.

En la siguiente figura se pueden observar las curvas correspondientes a la zona de estudio.



**Figura 9: Curvas IDF Concepción (Fuente: Elaboración Propia)**

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

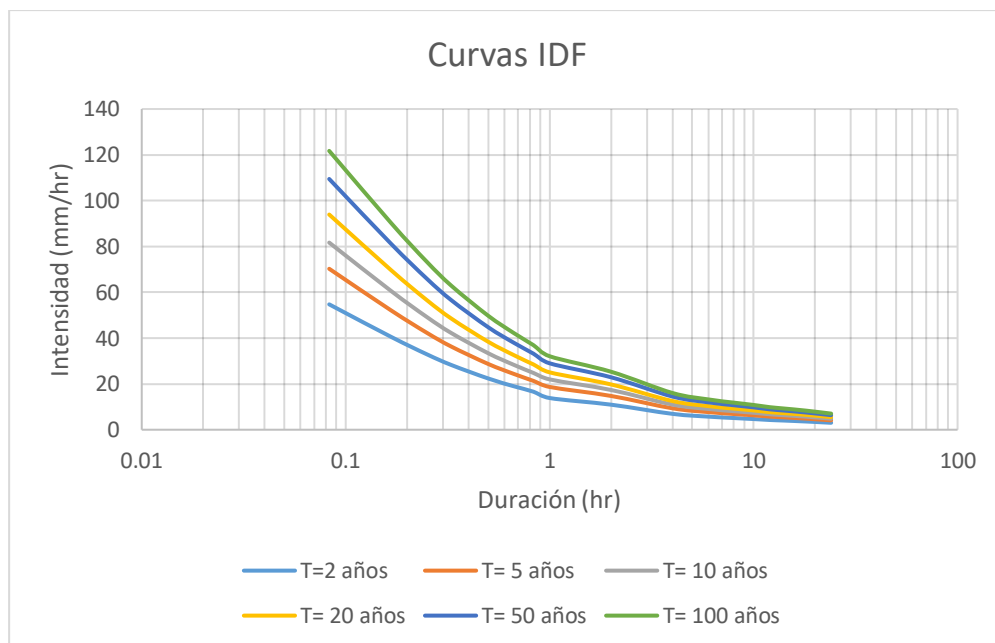
A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo a fin de obtener un umbral físico por precipitaciones.

### Desarrollo del modelo

Tras la obtención de las variables necesarias para la aplicación del modelo, se desarrollaron los siguientes pasos. Los cuales se describen con mayor exactitud en el [Anexo A]

#### *Obtención de intensidad límite*

En la siguiente figura se muestran las curvas IDF correspondientes a Concepción, necesarias para la obtención de la intensidad límite. Los datos necesarios para la construcción de estas curvas fueron obtenidas a partir de registros del MINVU.

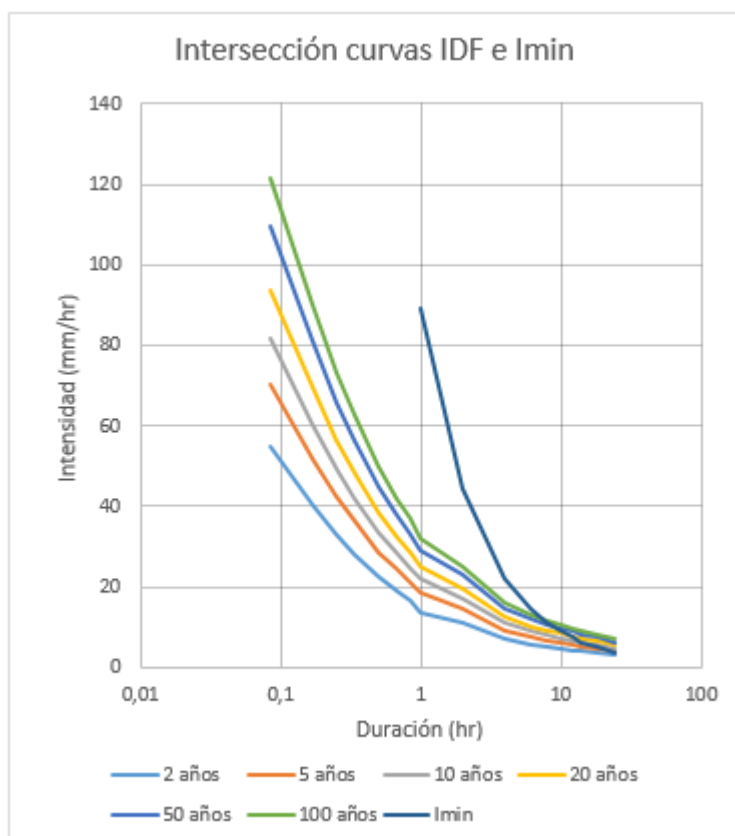


**Figura 10: Curvas IDF correspondientes a Concepción  
(Fuente: Elaboración Propia)**

El siguiente paso fue describir de manera gráfica la curva de intensidades mínimas ( $I_{min}$ ), para el suelo en estudio de acuerdo a las variables que la describen, a través de la siguiente expresión:

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[ z_w + S \cdot \ln \left( \frac{S + z_w}{S} \right) \right] \left( \frac{z_w + S}{z_w} \right) \quad (6)$$

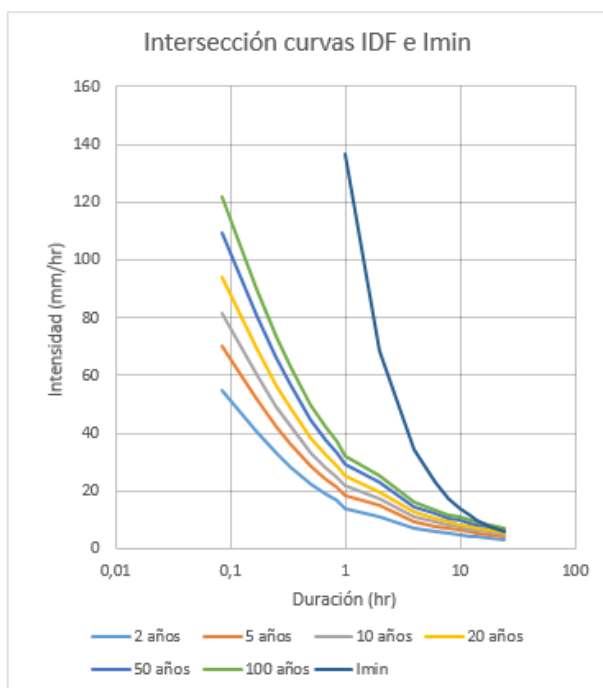
A modo de ejemplo, se graficará la curva de intensidades mínimas para el suelo SM a una profundidad de frente húmedo  $Z_w = 50$  cm, porosidad  $\mu = 0,39$  y  $S = 11$  cm. En la siguiente figura se puede observar la curva obtenida junto a las curvas IDF.



**Figura 11: Intersección Curvas IDF e intensidad mínima (Fuente: Elaboración propia)**

La intersección de las curvas IDF con la curva de intensidad mínima es el punto que define la intensidad límite necesaria para saturar el suelo completamente según D.Pradel, para cada periodo de retorno.

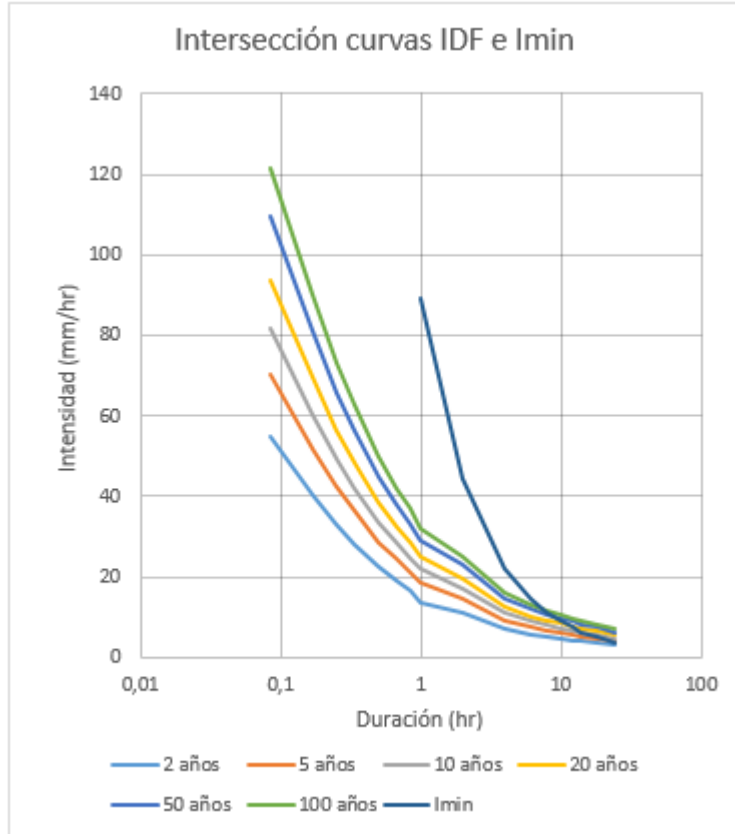
En los siguientes gráficos se pueden apreciar las intersecciones entre la curva de intensidad mínima y las curvas IDF para un punto de muestreo a distintas profundidades, y sus respectivas tablas con los valores de precipitación crítica.



**Figura 12: Intersección curva I<sub>min</sub> y curvas IDF, con Z<sub>w</sub>=50 cm (Fuente: Elaboración Propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Z <sub>w</sub> = 50 cm		S= 11 cm	
μ= 0,42			
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	20,7	7,38	152,7
50	23,8	6,42	152,9
20	*	*	*
10	*	*	*
5	*	*	*
2	*	*	*

**Tabla 2: Duraciones e intensidades límite Z<sub>w</sub>=50 cm ( Fuente: elaboración propia)**

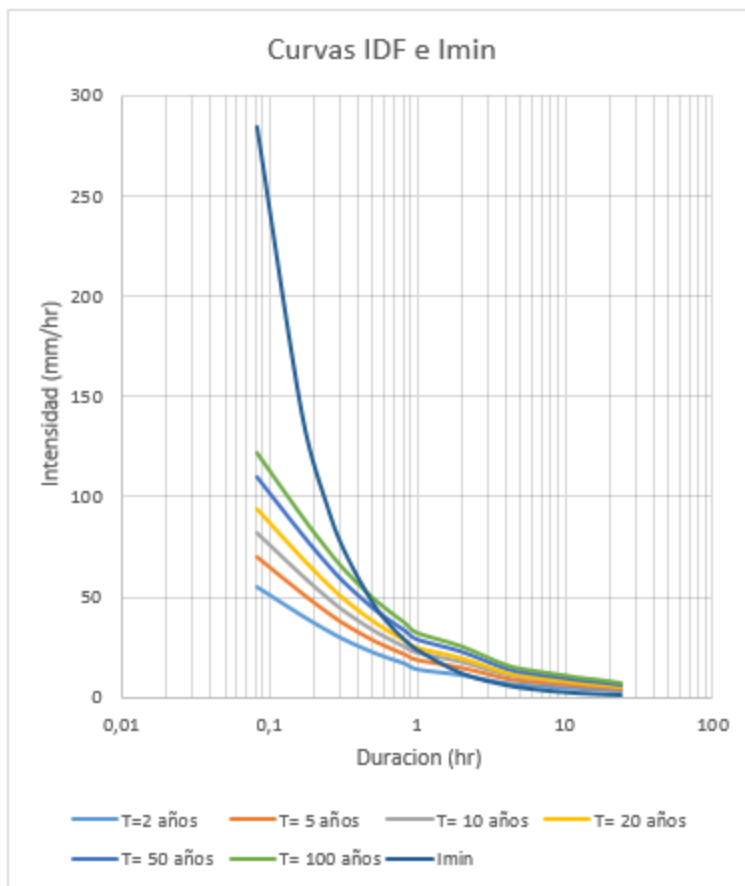


**Figura 13: Intersección curva Imin y curvas IDF, con  $Z_w=30$  cm (Fuente: Elaboración Propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 30 cm		S= 11 cm	$\mu= 0,42$
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	6,89	12,93	89,12
50	8,47	10,52	89,1
20	11,35	7,85	89,09
10	14,9	5,98	89,11
5	20,84	4,27	88,98
2	*	*	*

**Tabla 3: Duraciones e intensidades límites  $Z_w= 30$  cm (Fuente: Elaboración propia)**





**Figura 14: Intersección curva Imin y curvas IDF Zw= 10 cm (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 10 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,39$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	0,53	47,92	25,39
50	0,65	39,07	25,39
20	0,89	28,53	25,52
10	1,18	21,52	25,39
5	1,62	15,6	25,2
2	2,87	8,8	25,25

**Tabla 4: Duraciones e intensidades límite Zw= 10 cm (Fuente: Elaboración propia)**

Este procedimiento se realizó para cada uno de los sectores de muestreo para 10,30 y 50 cm de profundidad. De acuerdo a las tablas se puede apreciar la intensidad límite en mm/hr con

su duración correspondiente o bien calcular la precipitación total correspondiente al producto entre intensidad y duración en mm. Este valor corresponde al umbral de precipitación que propuso D. Pradel, quien asegura que este valor genera la saturación total del suelo gatillando posteriormente la inestabilidad del talud. Los cuadros que no presentan valores corresponden a puntos en los cuales no se genera una intersección entre la curva IDF para su respectivo periodo de retorno con la curva de intensidad mínima, lo cual quiere decir que de acuerdo a los registros históricos de precipitaciones no existe una lluvia capaz de saturar el suelo a dicha profundidad dentro de las primeras 24 horas para su respectivo periodo de retorno.

Los gráficos y cálculos pertinentes al punto de muestreo 2 y 3 se pueden observar en el **[Anexo C]**

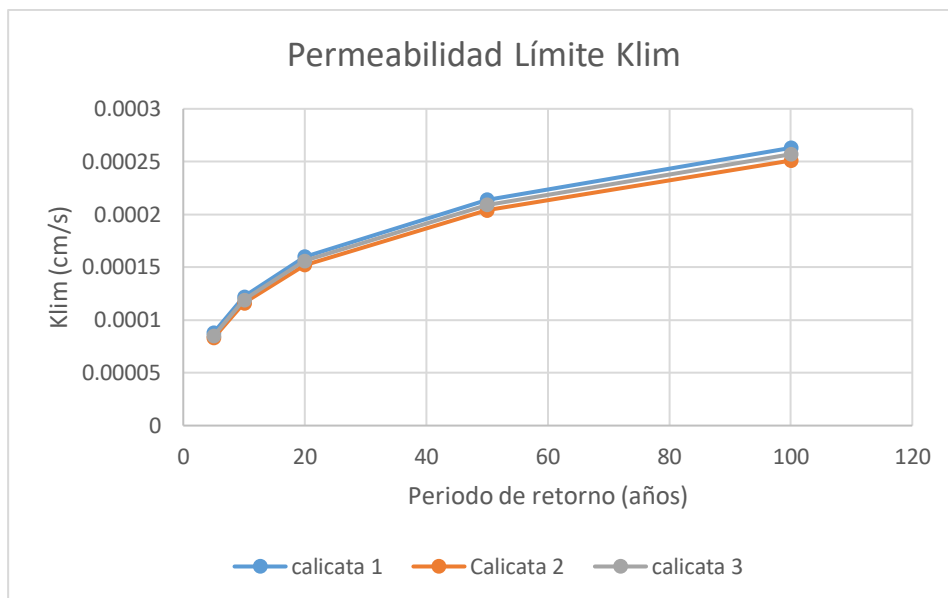
#### *Obtención de permeabilidad límite*

A partir de la expresión que define la intensidad límite mencionada anteriormente, es posible obtener la permeabilidad límite correspondiente a esta para sus respectivos periodos de retorno.

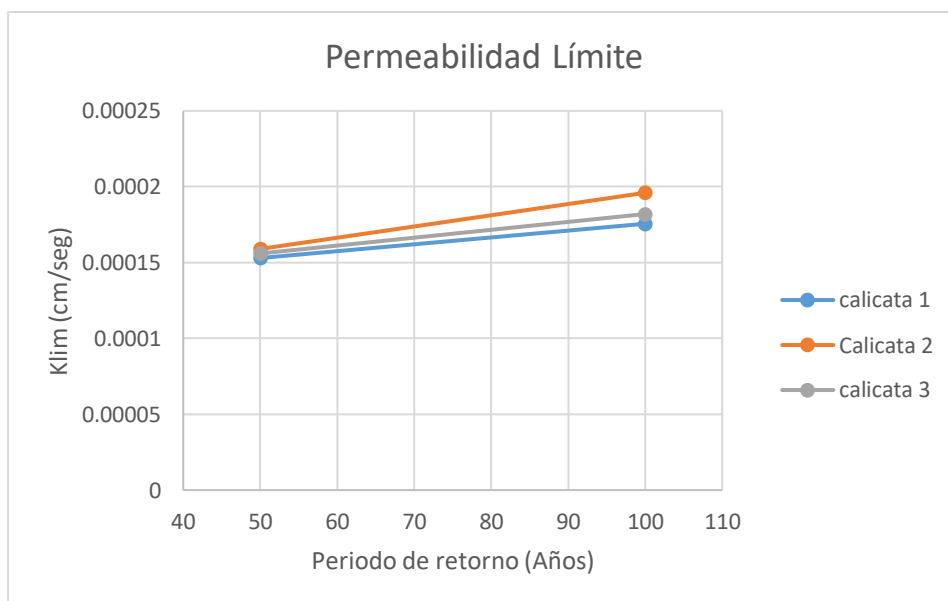
Lo anterior a través de la siguiente expresión:

$$k_{lim} = I_{min} \left( \frac{z_w}{z_w + S} \right) = \frac{\mu}{T_{min}} \left[ z_w - S \cdot \ln \left( \frac{S + z_w}{S} \right) \right] \quad (7)$$

A modo de ejemplo se estimó la permeabilidad límite para uno de los puntos de muestreo a una profundidad de 30 y 50 cm, definida para cada uno de los periodos de retorno correspondientes tal como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 15: Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno Zw= 30 cm (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 16 : Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno Zw= 50 cm (Fuente: Elaboración propia)**

Se puede observar con mayor detalle la permeabilidad límite correspondiente a cada punto de muestreo en distintas profundidades en el [Anexo C].

En la figura 15 se puede observar que la permeabilidad límite que rige a ese tipo de suelo a una profundidad de 30 cm corresponde a  $2,63 \cdot 10^{-4}$  cm/seg. Por tanto se puede apreciar que para distintos periodos de retorno la variación en el coeficiente de permeabilidad límite es muy pequeña. Por otra parte se puede observar que el límite de permeabilidad para el suelo presente en el talud de estudio a una profundidad de 50 cm, corresponde a  $1,96 \cdot 10^{-4}$  cm/seg para un periodo de retorno de 100 años, lo cual sugiere que en áreas con condiciones de suelo similares las lluvias con periodos de retorno de 100 años o menos no pueden saturar suelos con permeabilidades mayores a  $1,96 \cdot 10^{-4}$  cm/seg.

Además, se puede observar que a medida que la permeabilidad Klim disminuye, el periodo de retorno de la lluvia necesaria para saturar el suelo también lo hace. En otras palabras mientras más baja es la permeabilidad del suelo, mayor es la probabilidad de que la saturación se pueda desarrollar en el talud. Por lo tanto, materiales de limo y arcilla son más propensos a desarrollar las condiciones de inestabilidad superficial.

Para la obtención de la permeabilidad del suelo se realizaron 9 mediciones a través del método Porchet, considerando 3 en cada calicata analizada, mientras que para el permeámetro de carga variable se realizó un ensayo por calicata.

En la siguiente tabla se pueden observar los valores de permeabilidad obtenidos mediante el método Porchet y el permeámetro de carga variable.

Ensayo	Porchet	Permeámetro C.V
Calicata 1	$2,77 \cdot 10^{-3}$ cm/s	$2,37 \cdot 10^{-4}$ cm/s
Calicata 2	$2,31 \cdot 10^{-3}$ cm/s	$3,71 \cdot 10^{-4}$ cm/s
Calicata 3	$2,21 \cdot 10^{-3}$ cm/s	$2,31 \cdot 10^{-4}$ cm/s

**Tabla 5: Valores de permeabilidad mediante método Porchet y permeámetro C.V.  
(Fuente: Elaboración propia)**

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede apreciar que ninguno de los valores se encuentra bajo la permeabilidad límite especificada anteriormente para una profundidad de 50 cm, por lo cual, de acuerdo a lo señalado por Pradel, no es posible saturar el suelo a dicha profundidad. Por otro lado, de acuerdo a los valores de permeabilidad obtenidos en la C1 y C3 a una profundidad de 30 cm se puede observar que estos se encuentran bajo el valor de Klim, lo cual sugiere la probabilidad de que un evento lluvioso logre saturar el suelo a dicha profundidad.

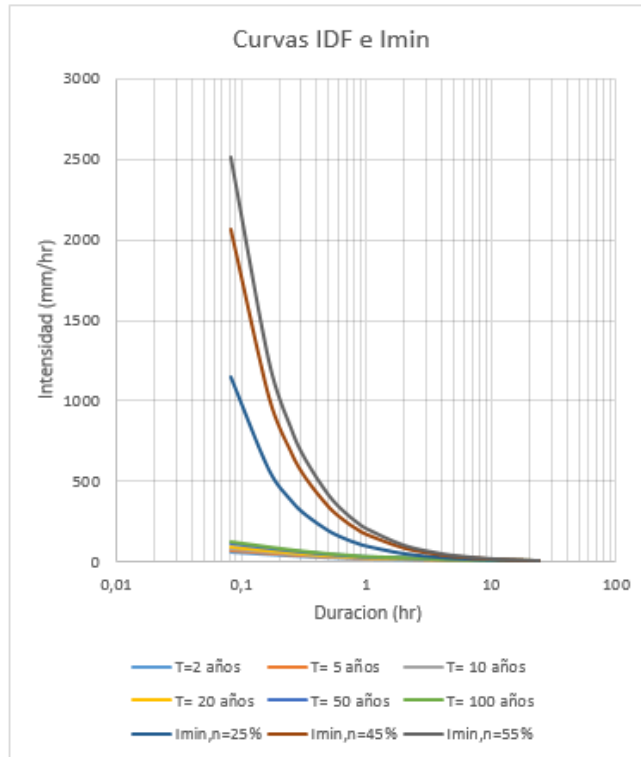
La variación existente entre cada uno de los ensayos realizados para medir conductividad hidráulica se debe principalmente a que el ensayo a través del permeámetro se hace mediante muestras remoldeadas que simulan las condiciones del terreno pero no presentan vegetación ni fisuras dentro de la masa de suelo ocasionadas por raíces o distintos organismos presentes, lo cual facilita considerablemente el paso del agua a través de este. Además al estar la masa de suelo confinada dentro del permeámetro, obliga a que el agua fluya de manera vertical, mientras que en terreno el agua fluye en todas direcciones.

### **Influencia de la porosidad del suelo, succión y profundidad del frente húmedo en la obtención del umbral por precipitación.**

En esta sección se evaluará el comportamiento de dichas variables dentro de los cálculos de umbral por precipitación.

#### *Porosidad del suelo*

Para evaluar esta variable se consideraron valores de porosidad de 25, 45 y 50% los cuales se encuentran dentro del rango de porosidad para una arena limosa correspondiente a este caso de estudio. Lo anterior, considerando valores de succión y profundidad del frente húmedo constante.



**Figura 17: Variación del umbral de precipitación al modificar porosidad (manteniendo succión y profundidad del frente húmedo constantes (Fuente: Elaboración Propia)**

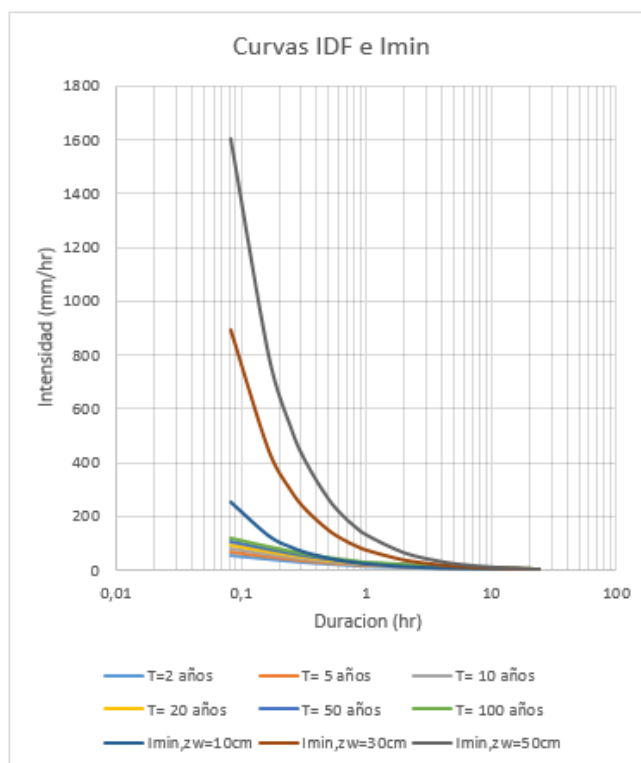
Succión=11 cm Zw=50 cm	
PP totales	P.R (100 años)
PP ( $\mu=25\%$ )	94,96 mm
PP ( $\mu=45\%$ )	170,8 mm
PP ( $\mu=50\%$ )	208,9 mm

**Tabla 6: Valores de precipitación total para distintos valores de porosidad, con succión y profundidad del frente húmedo constantes (Fuente: Elaboración propia)**

Como se puede apreciar en la figura 17 o la tabla 6, a medida que incrementa la porosidad del suelo, manteniendo constante el valor de succión y profundidad del frente húmedo, aumenta el valor de precipitación total, lo cual es congruente ya que al aumentar el volumen de vacíos dentro de la masa de suelo, la cantidad de agua necesaria para llenarlos también incrementa.

*Profundidad del frente húmedo*

En la figura 18 se puede observar que a medida que aumenta la profundidad del frente húmedo, las precipitaciones necesarias para saturar el suelo también aumentan, lo cual es congruente puesto que al aumentar la longitud de profundidad del suelo, también lo hace su volumen de masa y, por lo tanto, necesita una mayor cantidad de precipitaciones para lograr saturar el suelo a dicha profundidad.



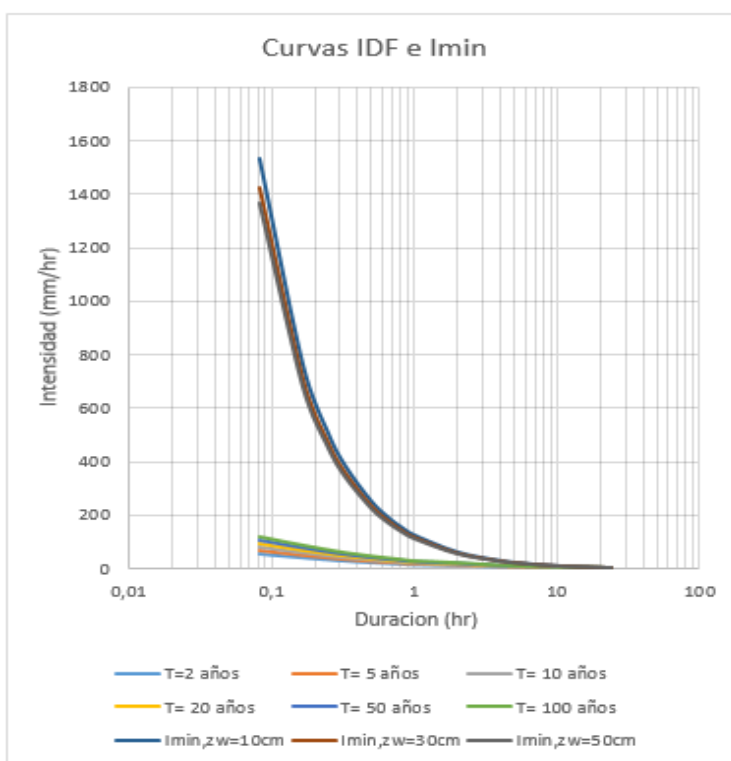
**Figura 18: Variación en el umbral de precipitación modificando profundidad del frente húmedo (con succión y porosidad constante (Fuente: Elaboración propia)**

Succión=11 cm $\mu =0,35$ cm	
PP totales	P.R (100 años)
PP (zw=10cm)	21,21 mm
PP (zw=30cm)	74,18 mm
PP (zw=50cm)	132,9 mm

**Tabla 7: Precipitación total para distintos valores de profundidad del frente húmedo, considerando succión y porosidad constantes (Fuente: Elaboración Propia)**

*Succión*

Finalmente se evaluó el comportamiento frente a variaciones de succión manteniendo constante la profundidad y porosidad del suelo. Es importante saber que los valores de succión en el frente húmedo corresponden al potencial matricial generado en dicha zona de interfase y son muy bajos. Para estudiar el comportamiento de este parámetro se utilizaron dos valores de succión los cuales se encuentran dentro del rango establecido por el modelo de Green-Ampt para arena limosa y uno correspondiente a un suelo de tipo arcilloso, considerando el suelo con peores condiciones mecánicas.



**Figura 19: Variación en el umbral de precipitación modificando succión en el frente húmedo (con porosidad y profundidad constantes)  
(Fuente: Elaboración propia)**

Se puede apreciar en la figura que las variaciones presentes son prácticamente insignificantes e independientes del tipo de suelo. Esto se debe a las pequeñas diferencias en los valores de succión incluso al ser comparados con suelos de tipo arcilloso. Recordar que los valores de



succión de acuerdo al modelo de Green-Ampt oscilan entre los 1,07 Kpa para arenas hasta los 3,2 Kpa para suelos arcillosos.

Por lo tanto, una propuesta de umbral físico por precipitaciones para la Autopista del Itata con los valores de porosidad, succión, permeabilidad y profundidad del frente húmedo definidos anteriormente será de 150.9 mm, 91.1 mm y 25.8 mm para 50, 30 y 10 cm respectivamente, dentro de las primeras 24 horas. Estos valores según lo establecido por D.Pradel aseguran la saturación total de la masa de suelo del talud generando la inestabilidad y posterior falla de este.

Es importante mencionar que los valores de precipitación total señalados anteriormente son prácticamente iguales para cada periodo de retorno, siempre y cuando la profundidad del frente húmedo, succión y porosidad del suelo se mantengan constantes. Lo anterior debido a que la masa de suelo seguiría siendo la misma y como se indicó anteriormente sus parámetros físicos se mantendrían constantes.

Los valores que presentan variaciones son la intensidad límite de precipitaciones y su duración respectiva, puesto que estos dependen del comportamiento exclusivo de las curvas IDF.

Por otra parte se puede observar que los valores de precipitación total mencionados anteriormente son muy elevados, considerando que las precipitaciones anuales de nuestra región rodean los 1100 mm. Sin embargo, pueden existir eventos meteorológicos extremos como por ejemplo el temporal ocurrido en la región el año 2006, entre los días 10 al 13 de julio donde de acuerdo a informes entregados por la ONEMI, los mm totales caídos dentro de las primeras 24 horas fueron los siguientes:

<b>FECHA</b>	<b>ESTACION</b>	<b>mm en 24 hrs.</b>
10 julio 2006	Concepción	106.6
10 julio 2006	Chillan	82.4
10 julio 2006	Alto Bío Bío	224
10 julio 2006	Central Pangué	241

**Tabla 8: Valores de precipitación total caídos dentro de las primeras 24 horas**  
**(Fuente: ONEMI, Gobierno de Chile, 2006)**

De acuerdo a lo anterior es posible que se generen las condiciones necesarias para saturar el suelo dentro de las primeras 24 horas. De no ser así los centímetros restantes podrían saturarse en las horas siguientes generando así la inestabilidad y posterior falla del talud.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se observa del estudio de D.Pradel que su método para determinar la inestabilidad de taludes frente a precipitaciones es muy conservador puesto que no considera valores de succión por sobre el frente húmedo ni el efecto de la evaporación o escape de las precipitaciones dentro de los cálculos. Por lo tanto, la inestabilidad depende principalmente de la intensidad de precipitaciones y la permeabilidad del suelo.
- Esta investigación mostró que los valores de umbral por precipitación obtenidos son muy elevados, sin embargo, ciertas condiciones meteorológicas pueden generar estos eventos dentro de las primeras 24 horas. De no ser así los centímetros restantes de suelo se podrían saturar en las siguientes horas y de esta forma desencadenar la inestabilidad del talud y su posterior falla.
- De acuerdo a los cálculos obtenidos, el umbral por precipitación para taludes en la autopista del Itata a una profundidad de 50 cm corresponde a un promedio de 150 mm para un periodo de retorno de 100 años, con una permeabilidad límite (Klim) de  $1,56 \cdot 10^{-4}$  cm/s. Los resultados de laboratorio respecto al coeficiente de permeabilidad del suelo presente en la autopista del Itata arrojaron que el valor se encuentra por sobre el límite establecido por lo que no es posible que el suelo logre saturarse a dicha profundidad y se produzca una inestabilidad superficial del talud.
- Se pudo observar que las variables más determinantes dentro de los cálculos son la porosidad y profundidad del frente húmedo, ya que a medida que estos aumentan; la precipitación necesaria para saturar el suelo también lo hace, y ello es congruente puesto que aumentan los vacíos y longitud de la masa de suelo a saturar.

- Debido a que esta investigación se desarrolló en base a un tramo del talud no es posible generalizar los resultados para toda la autopista puesto que el tipo de suelo puede diferir con la clasificación obtenida en esta investigación y de esta forma afectar los resultados finales.
- Si bien la permeabilidad del suelo presente en la Autopista del Itata se encuentra sobre la permeabilidad límite calculada, los puntuales deslizamientos generados en dicho sector se deben posiblemente a los efectos de la erosión que presentan los suelos debido a precipitaciones, lo cual modifica la geometría del talud y por tanto los esfuerzos a los que está sometido, resultando un talud diferente al inicialmente analizado. Otro factor importante a mencionar son los sismos que suman fuerzas dinámicas a las fuerzas estáticas a las que está sometido el talud provocando así esfuerzos cortantes mayores que reducen la resistencia al corte del suelo gatillando así la eventual falla.

### **Recomendaciones**

- Comparar los resultados obtenidos tras la aplicación de otros modelos para determinación de umbrales por precipitación en suelos presentes en la autopista del Itata y de esta forma evaluar la similitud con los resultados obtenidos en esta investigación.
- Hacer uso de softwares considerando elementos finitos puesto que estos consideran variables muy importantes como la succión del suelo. Se ha demostrado en diversas investigaciones que el suelo a pesar de encontrarse en estado saturado aún presenta valores de succión a pesar de que teóricamente no sea así, por lo tanto es muy importante considerar este parámetro dentro del análisis.
- Desarrollar este modelo en base a curvas IDF para duraciones sobre 24 horas, puesto que en esta investigación anteriormente se observó que en periodos de retorno

específicos y de acuerdo a registros históricos de precipitaciones no existen eventos lluviosos capaces de saturar el suelo dentro de dichas 24 horas. Por ello sería interesante estudiar su comportamiento para duraciones más allá de las 24 horas.

- Aplicar este modelo a un talud que haya presentado una falla de tipo superficial por precipitaciones a fin de evaluar la veracidad del modelo y de esta forma poder aplicarlo en futuros eventos de manera preventiva.

## **BIBLIOGRAFÍA**

*Puga P.,(2012) Memoria de título “Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas”, Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería civil. Concepción, Chile.*

*Meza V., (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria, Bol. Ciencias Tierra, número 31, p. 23,38. Medellín Colombia, Sur América.*

*Angelone S. y Garibay M.,(2006) Permeabilidad de suelos, geología y geotecnia, facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura, Universidad nacional de Rosario, Argentina.*

*S. Cho y S. Lee. Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 9, páginas 756–763, Septiembre 1, 2002.*

*D. Pradel y G. Raad. Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. Journal of geotechnical engineering, vol 19, N°2, Páginas 315-332, february 1993.*

*J. Suarez. Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Capítulo 7. 2012.*

*Collins y Znidarcic. Stability analyses of rainfall induced landslide. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 130 (4), pág 81-93, 2004.*

*S.J. Matlan, M.L.Lee, N.Gofar, Backanalysis of rainfall induced landslides by perisi model, GEOTROPIKA, Kota Kinabalu, 2010*

*M.F. Ishak, N. Ali, A.Kassim, The effect of tree induce suction on slope stabilization Analysis, International Journal of civil Engineering and Geo-Environmental, 20013u*

*Bujang B. K. Huat, Faisal HJ. Ali and T.H Low, Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability, Geotechnical and Geological Engineering, 2006.*

*Gallegos G., Rojas E., Leal J.C, Mora R.S, Efecto de la succion en la estabilidad de un talud de arena limosa, Ingeniería Investigación y Tecnología, Volumen XIII, Julio-Septiembre 2012.*

*Valverde E., Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud, Instituto tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en construcción, Junio del 2010.*

*Aristizábal E., Martínez H., Vélez J.I, Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias, Rev.Acad.Colombia.Cienc:34, 2010.*

*Wei Chao Li, Lee Min Lee, Hong Jie Li, F.C Dai, Ming Long Wang, Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slopes, Engineering Geology, Malaysia 2013.*

*Lee Min Lee, Nurlay Gofar, Harianto Rahardjo, A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability, Engineering Geology, Malaysia 2009.*

*Jaehong Kim, Sangseom Jeong, Seongwan Park, Jitendra Sharma, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils, Engineering Geology 75, 2004.*

*Rahardjo y otros. Factor controlling in stability fo homogeous soil slope under rainfall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133 (12), pág 1532-1543, 2007.*

*Fredlund y Rahardjo. Soil mechanics for unsaturated soils, Wiley, New York, 1993*

*Collins y Znidarcic. Stability analyses of rainfall induced landslide. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 130 (4), pág 81-93, 2004*

## **ANEXOS**



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO A:</b> Efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes homogéneos. D.Pradel y G.Raad (1993) .....	49
<b>ANEXO B:</b> Mécanica de suelos.....	57
<b>ANEXO C:</b> Permeabilidad límite (Klim) e intensidad límite de precipitaciones. ....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sección transversal que muestra el área húmeda por lluvia o riego .....	51
<b>Figura 2:</b> Intersección curva intensidad mínima e IDF, para Los Ángeles.....	54
<b>Figura 3:</b> Curvas IDF para distintos periodos de retorno en Los Ángeles.....	55
<b>Figura 4:</b> Intersección curva intensidad mínima e IDF, para Ventura.....	56
<b>Figura 5:</b> Intersección curva intensidad mínima e IDF, para Orange.....	57
<b>Figura 6:</b> Intersección curva intensidad mínima e IDF, para San Diego.....	57
<b>Figura 7:</b> Permeabilidad límite en suelos granulares para varios periodos de retorno en las 4 localidades de estudio .....	58
<b>Figura 8:</b> Permeabilidad límite en suelos arcillosos para varios periodos de retorno en las 4 localidades de estudio .....	58
<b>Figura 9:</b> Ensayo picnómetro .....	63
<b>Figura 10:</b> Ensayo picnómetro .....	64
<b>Figura 11:</b> Curva de calibración picnómetro.....	64
<b>Figura 12:</b> Esquema método Porchet.....	66
<b>Figura 13:</b> Aplicación método Porchet .....	70
<b>Figura 14:</b> Aplicación método Porchet .....	70
<b>Figura 15:</b> Esquema permeámetro de carga variable.....	72
<b>Figura 16:</b> Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad católica de la Santísima Concepción .....	74
<b>Figura 17:</b> Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad católica de la Santísima Concepción .....	75
<b>Figura 18:</b> Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad de Concepción.....	75

<b>Figura 19:</b> Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad de Concepción.....	76
<b>Figura 20:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-1 .....	77
<b>Figura 21:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 30 cm C-1 .....	78
<b>Figura 22:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 10 cm C-1 .....	79
<b>Figura 23:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-2 .....	80
<b>Figura 24:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 30 cm C-2 .....	81
<b>Figura 25:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 10 cm C-2 .....	82
<b>Figura 26:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-3 .....	83
<b>Figura 27:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-3 .....	84
<b>Figura 28:</b> Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-3 .....	85
<b>Figura 29:</b> Curva de permeabilidad límite para distintos periodos de retorno .....	86
<b>Figura 30:</b> Curva de permeabilidad límite para distintos periodos de retorno.....	87
<b>Figura 31:</b> Curva de permeabilidad límite para distintos periodos de retorno.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Clasificación de suelo C-1 .....	60
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de suelo C-2.....	61
<b>Tabla 3:</b> Clasificación de suelo C-3 .....	62
<b>Tabla 4:</b> Porosidad .....	63
<b>Tabla 5:</b> Porchet C-1 .....	67
<b>Tabla 6:</b> Porchet C-2 .....	68
<b>Tabla 7:</b> Porchet C-3 .....	69
<b>Tabla 8:</b> Permeámetro de carga variable .....	73
<b>Tabla 9:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=50 cm C-1 .....	77
<b>Tabla 10:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=30 cm C-1 .....	78
<b>Tabla 11:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=10 cm C-1 .....	79
<b>Tabla 12:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=50 cm C-2 .....	80
<b>Tabla 13:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=30 cm C-2 .....	81
<b>Tabla 14:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=10 cm C-2 .....	82
<b>Tabla 15:</b> Duraciones e intensidades límite Zw=50 cm C-3 .....	83

<b>Tabla 16:</b> Duraciones e intensidades límite $Z_w=30$ cm C-3 .....	84
<b>Tabla 17:</b> Duraciones e intensidades límite $Z_w=10$ cm C-3 .....	85
<b>Tabla 18:</b> Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno .....	86
<b>Tabla 19:</b> Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno .....	87
<b>Tabla 20:</b> Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno .....	88

## ANEXO A: Efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes homogéneos. D.Pradel y G.Raad (1993)

### Estabilidad Superficial

Durante lluvias intensas, el agua se infiltra dentro del suelo, saturando las capas superiores de este. La presión de poros desarrolla y reduce la resistencia al corte del suelo. Cuando los suelos más superficiales se encuentran sobre una capa de suelo más impermeable, se desarrolla un flujo paralelo a la cara del talud. Esta condición reduce el factor de seguridad del talud y puede causar fallas superficiales.

Antes de que el mecanismo de falla con flujo paralelo a la cara del talud se desarrolle, el suelo debe alcanzar la saturación. Los requerimientos mínimos para alcanzar la saturación son:

- Lluvias lo suficientemente intensas para exceder la tasa de infiltración del material
- Lluvias suficientemente largas para saturar el talud a una profundidad  $Z_w$

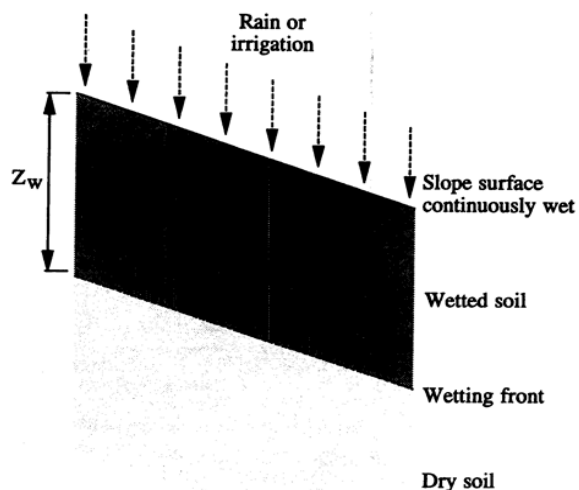


Figura 1: Sección transversal que muestra el área húmeda por lluvia o riego (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)

## Principios de infiltración

Un simple modelo para infiltración, basado en la ley de Darcy, fue propuesto por Green and Ampt (1911). Este modelo entrega predicciones razonables incluso cuando es comparado con otras aproximaciones más rigurosas basadas en flujos insaturados. El modelo está basado en los siguientes supuestos.

- La superficie del suelo está continuamente mojada
- Hay un frente húmedo distintivo (tal como se muestra en la figura anterior)
- El coeficiente de permeabilidad en la zona húmeda  $K_w$ , no varía con el tiempo
- Hay una constante presión negativa justo por encima del frente húmedo

De acuerdo a este modelo el tiempo necesario para saturar el suelo a una profundidad  $Z_w$  es:

$$T_w = \frac{\mu}{k_w} \left[ z_w - S \cdot \ln \left( \frac{S + z_w}{S} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

- $\mu$  = Porosidad húmeda
- $K_w$  = Coeficiente de permeabilidad en la zona húmeda
- $S$  = Succión en el frente húmedo
- $Z_w$  = Profundidad del frente húmedo

La tasa de infiltración  $V_i$ , es la tasa a la cual el agua ingresa a la superficie del suelo. El modelo Green-Ampt predice:

$$v_i = k_w \frac{z_w + S}{z_w} \quad (4)$$

Antes de que el mecanismo de falla con filtración paralela a la cara del talud ocurra, el suelo debe alcanzar la saturación. La primera condición para saturación requiere que la intensidad de lluvia  $I$ , debe ser mayor que la tasa de infiltración  $V_i$ . La siguiente condición requiere que la precipitación debe durar más que  $T_w$ . Por lo tanto, estas condiciones requieren que  $T \geq T_w$  e  $I \geq V_i$ . Estas inecuaciones proveen un requerimiento mínimo para saturación a una profundidad  $Z_w$ .

$$\begin{aligned} T_{\min} &= T_w \\ I_{\min} &= v_i \end{aligned} \quad (5)$$

Combinando (3), (4) y (5) es posible relacionar  $I_{\min}$  y  $T_{\min}$ , a través de la siguiente expresión:

$$I_{\min} = \frac{\mu}{T_{\min}} \left[ z_w + S \cdot \ln \left( \frac{S + z_w}{S} \right) \right] \left( \frac{z_w + S}{z_w} \right) \quad (6)$$

Se puede apreciar que esta ecuación no considera los efectos de escape o evotranspiración. Por lo tanto, intensidades de lluvia muy mayores que  $I_{\min}$  pueden ser requeridas para producir la saturación.

### **Permeabilidad límite Klim**

La condición en (6) provee los requerimientos mínimos para saturación a una profundidad  $Z_w$ . Esta condición es comparada en la figura [2] con datos estadísticos de intensidades de precipitación para la ciudad de Los Ángeles de la figura [3]. La localización donde se encuentra la línea que define la intensidad máxima de precipitación y la que da el requisito mínimo de saturación define la duración mínima de lluvia capaz de saturar el suelo del talud a una profundidad  $Z_w$ .

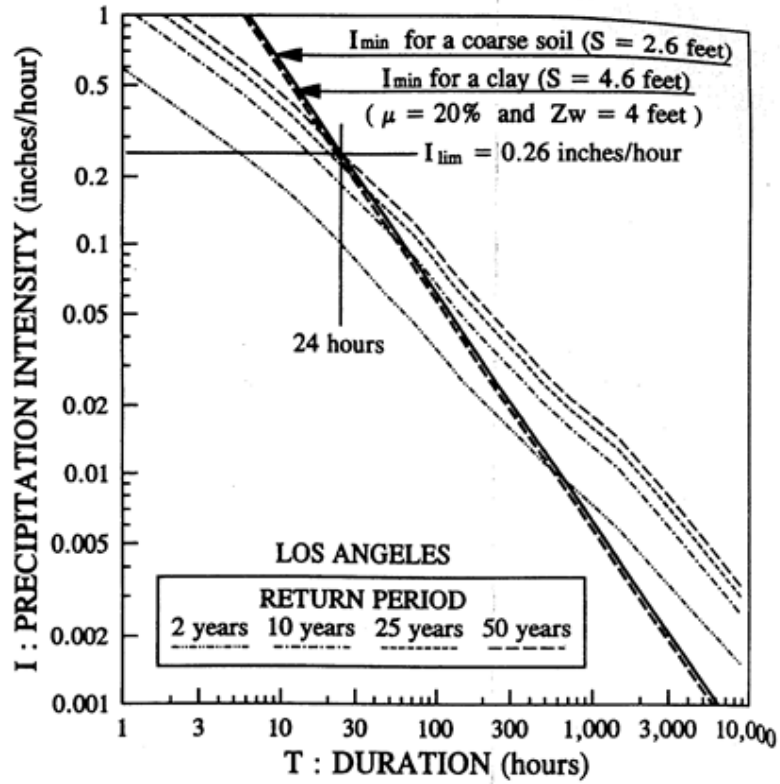
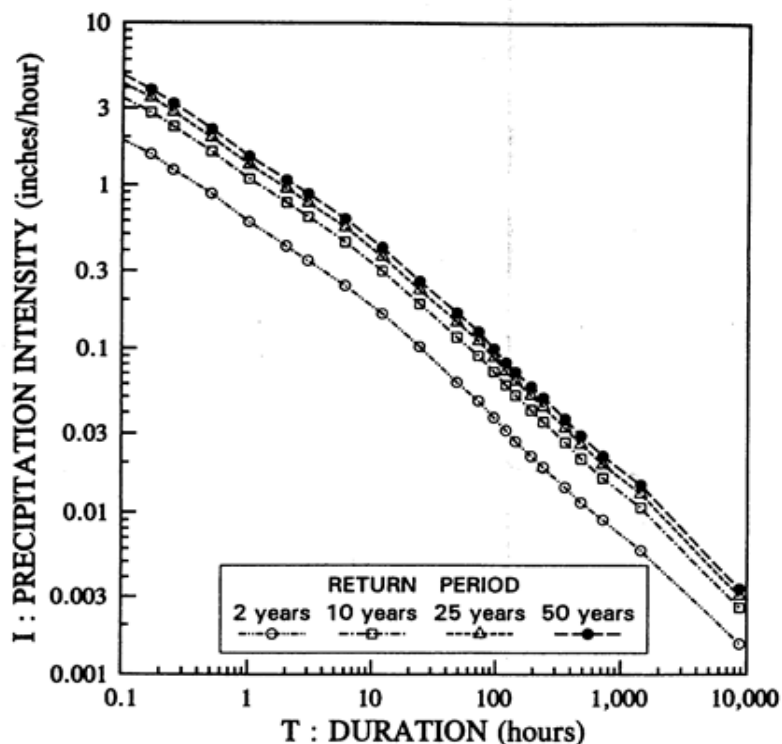


Figura 2: Intersección curva intensidad mínima e IDF, para Los Ángeles (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)



**Figura 3: Curvas IDF para distintos periodos de retorno en Los Ángeles (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)**

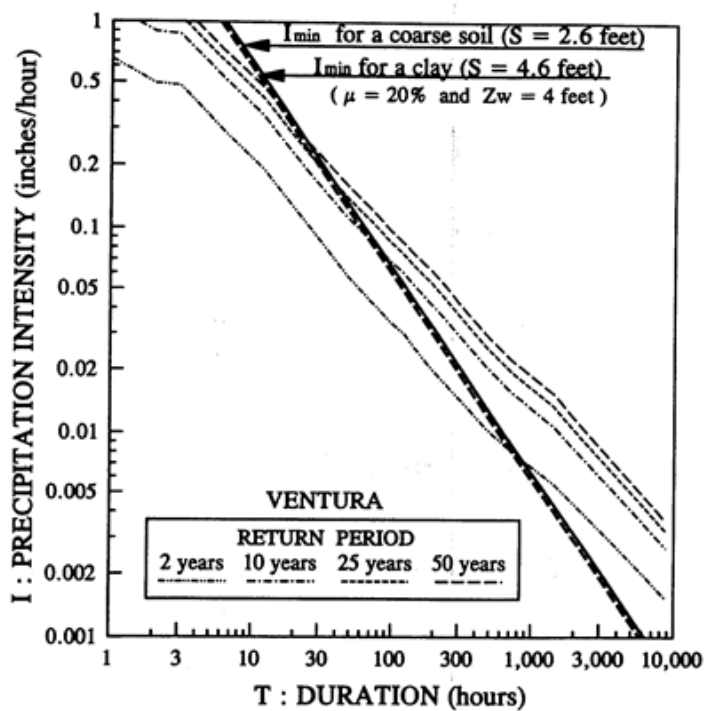
Esta figura muestra que para un suelo grueso donde  $\mu=20\%$  y  $Z_w=1.22\text{m}$  una lluvia con periodo de retorno de 50 años tendría que durar por lo menos 24 horas para saturar el suelo. La intensidad límite  $I_{lim} = 6.6\text{mm}$  (0.26 in) /hora corresponde a esta duración. La figura 2 define la permeabilidad límite  $K_{lim} = 1.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ . Usando el mismo procedimiento para el suelo arcilloso resulta un  $K_{lim} = 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ . Notar que el rango de permeabilidad  $K_{lim}$  es pequeño y no varía mucho con el tipo de suelo.

Los datos estadísticos de precipitación junto con las curvas de intensidad mínima también fueron analizados para las ciudades de San Diego, Ventura y Orange, los cuales se muestran en las figuras [4], [5] y [6]. Estos muestran que el proceso de saturación a una profundidad de 1.22m es largo. Esto requiere una acumulación gradual de muestras en el suelo durante un periodo prolongado de tiempo.

Por lo tanto, una corta e intensa lluvia luego de un prolongado periodo seco, no logra crear las condiciones que lleven a la saturación. Sin embargo, una lluvia intensa luego de un



periodo de lluvias moderadas, podría saturar los restantes centímetros superiores de suelo no saturado y de esta forma desencadenar un deslizamiento.



**Figura 4: Intersección curva intensidad mínima e IDF, para Ventura (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)**

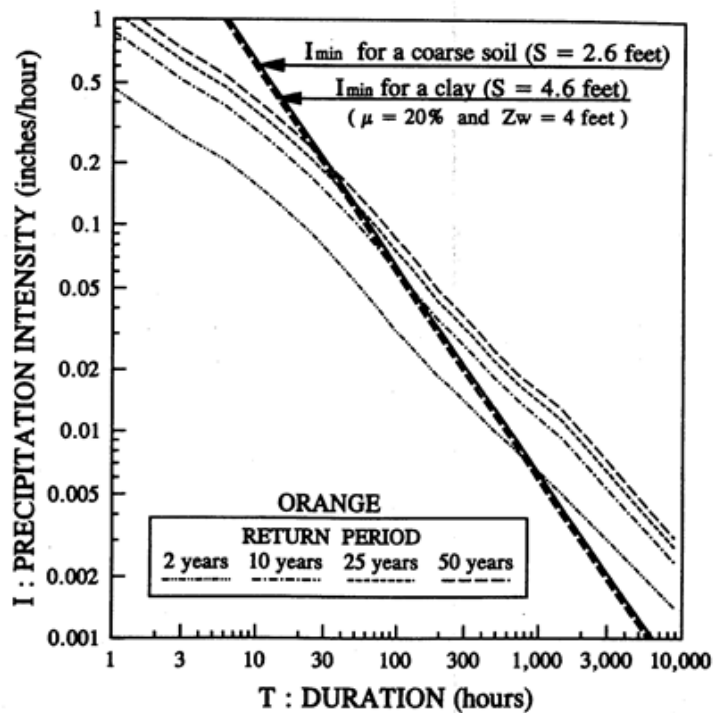


Figura 5: Intersección curva intensidad mínima e IDF, para Orange (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)

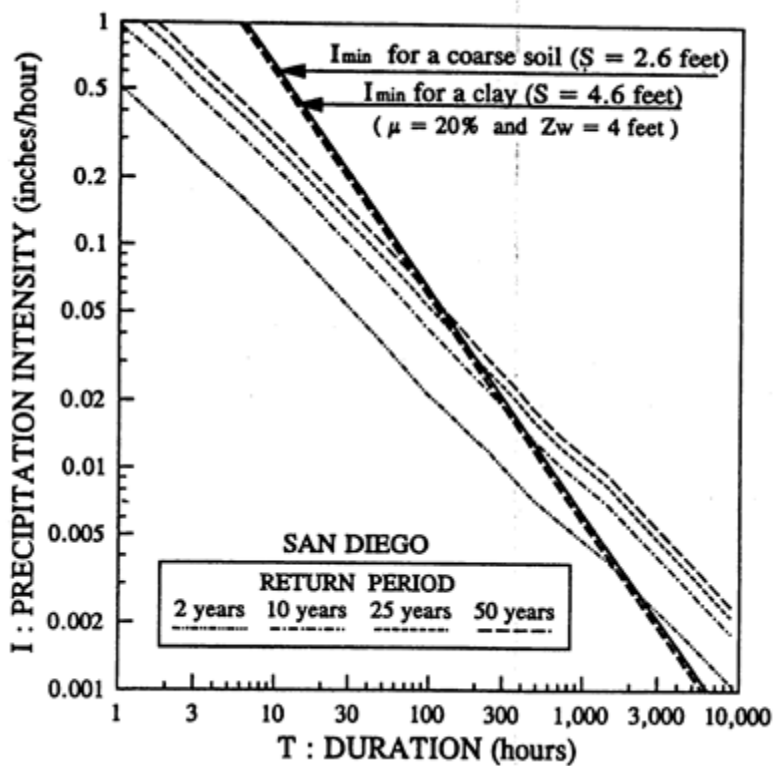


Figura 6: Intersección curva intensidad mínima e IDF, para San Diego (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)

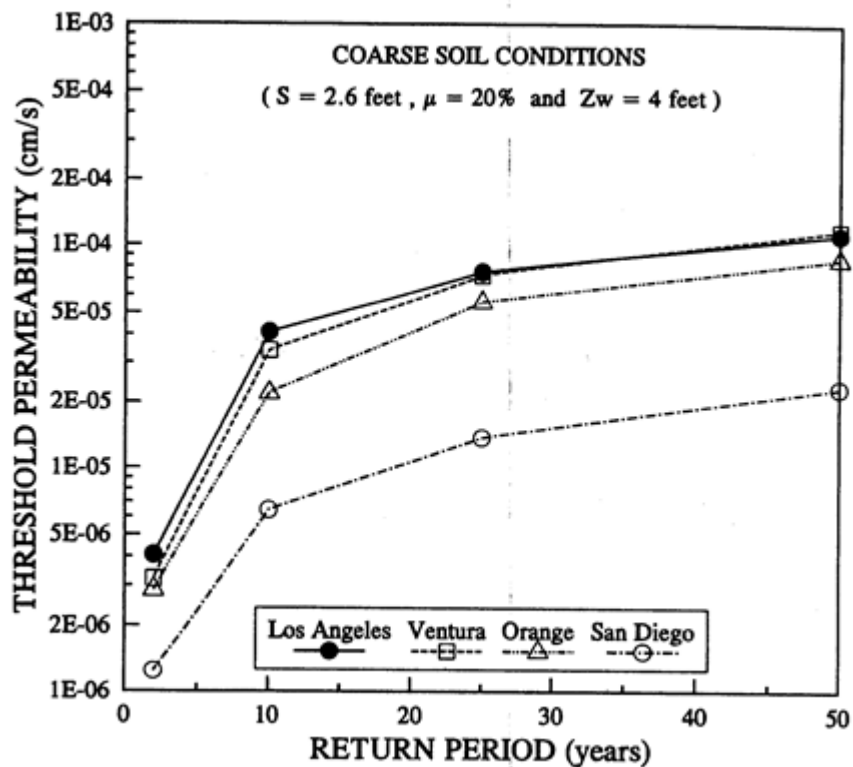


Figura 7: Permeabilidad límite en suelos granulares para varios periodos de retorno en las 4 localidades de estudio (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)

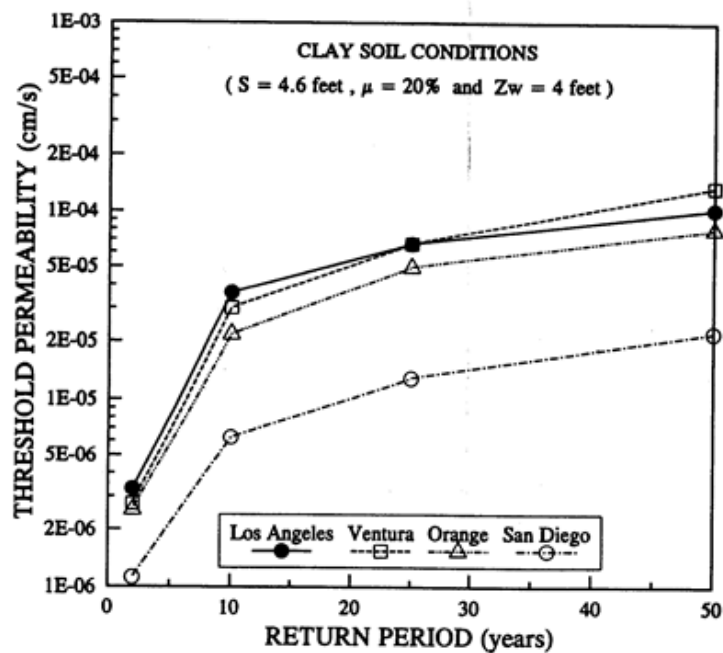


Figura 8: Permeabilidad límite en suelos arcillosos para varios periodos de retorno en las 4 localidades de estudio (Fuente: D.Pradel y G.Raad, 1993)

## **Factores que afectan $K_{lim}$**

Varios factores pueden afectar el límite de permeabilidad  $K_{lim}$ . Escape, evaporación y transpiración tendrían un alto impacto en  $K_{lim}$ . En taludes hechos por el hombre también están los efectos de la irrigación por paisajismo.

Se puede notar además que los valores de  $K_{lim}$  en la figura 7 y 8 se basan en una profundidad de 1.22m. Si se considera una profundidad distinta, entonces el límite de permeabilidad  $K_{lim}$  podría cambiar. Los registros de lluvia muestran que a medida que la profundidad de saturación se hace más superficial,  $K_{lim}$  aumenta, lo cual podría implicar que las fallas superficiales sean más propensas a desarrollarse a lo largo de planos poco profundos (0,61m) que en aquellos más profundos (1,22).

**ANEXO B: Mécanica de suelos**

**CLASIFICACIÓN DE SUELOS C-1**

Concepción, Diciembre de 2016

**IDENTIFICACIÓN ÍTEM DE ENSAYO**

Muestra : C-1  
 Material (inspección Visual) : Arena Limosa

**RESULTADOS ENSAYOS**

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	Peso ret. (gr)	% retenido	% que pasa
3"	80.0			
2 1/2"	63.0			
2"	50.0			
1 1/2"	37.5			
1"	25.0			
3/4"	19.0			
3/8"	9.50			100
N°4	4.75	9.1	1.5	98.5
N°10	2.00	34.5	5.7	92.8
N°20	0.85			
N°40	0.425	105.3	17.4	75.4
N°60	0.250			
N°200	0.075	217.3	35.9	39.5
<b>Residuo</b>		238.3	39.4	
Límite Líquido			30	
Límite Plástico			25	
Índice de Plasticidad			5	
Clasificación USCS			SM	

**CLASIFICACIÓN DE SUELOS C-2**

Concepción, Diciembre de 2016

**IDENTIFICACIÓN ÍTEM DE ENSAYO**

Muestra : C-2

Material (inspección Visual) : Arena Limosa

**RESULTADOS ENSAYOS**

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	Peso ret. (gr)	% retenido	% que pasa
3"	80.0			
2 1/2"	63.0			
2"	50.0			
1 1/2"	37.5			
1"	25.0			
3/4"	19.0			
3/8"	9.50			100
Nº4	4.75	8.1	1.31	98.7
Nº10	2.00	41.1	6.7	92
Nº20	0.85			
Nº40	0.425	112.6	18.3	73.7
Nº60	0.250			
Nº200	0.075	222.7	36.2	37.5
<b>Residuo</b>		230	37.4	
Límite Líquido			30	
Límite Plástico			25	
Índice de Plasticidad			5	
Clasificación USCS			SM	

**CLASIFICACIÓN DE SUELOS C-3**

Concepción, Diciembre de 2016

**IDENTIFICACIÓN ÍTEM DE ENSAYO**

Muestra : C-3  
 Material (inspección Visual) : Arena Limosa

**RESULTADOS ENSAYOS**

TAMICES ASTM	Abertura (mm)	Peso ret. (gr)	% retenido	% que pasa
3"	80.0			
2 1/2"	63.0			
2"	50.0			
1 1/2"	37.5			
1"	25.0			
3/4"	19.0			
3/8"	9.50			100
N°4	4.75	11.4	1.9	98.1
N°10	2.00	66.3	11.0	87.1
N°20	0.85			
N°40	0.425	119.1	19.8	67.3
N°60	0.250			
N°200	0.075	185.1	30.8	36.5
<b>Residuo</b>		219.1	36.5	
Límite Líquido		30		
Límite Plástico		25		
Índice de Plasticidad		5		
Clasificación USCS		SM		

**POROSIDAD**

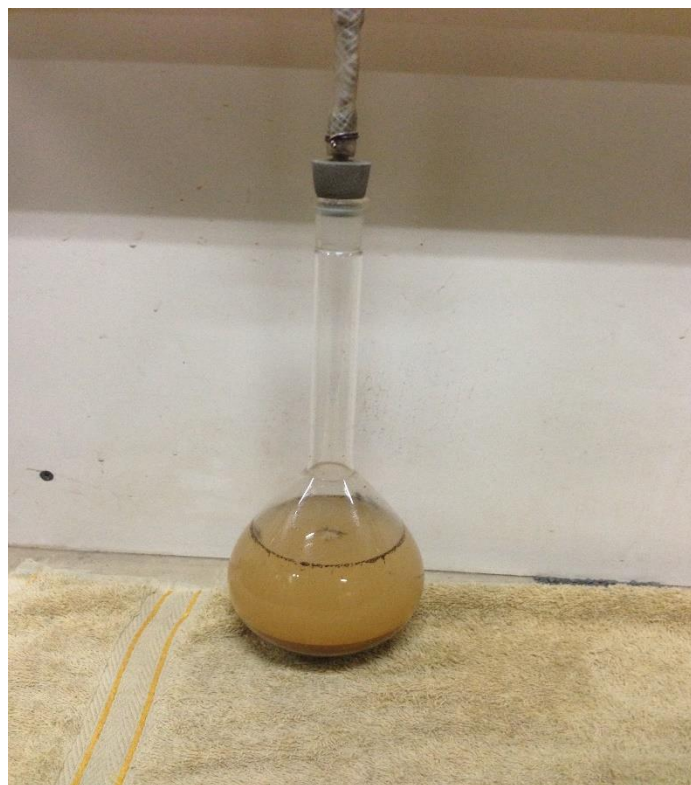
Concepción, Diciembre de 2016

**IDENTIFICACIÓN ÍTEM DE ENSAYO**

Muestra : C-1 ; C-2 ; C-3

Material (inspección Visual) : Arena Limosa

Masa de suelo	100 gr
Picnómetro + Agua	662,15 gr
Picnómetro + Agua + Suelo	725,5 gr
Densidad Real	2,728 Kg / cm <sup>3</sup>

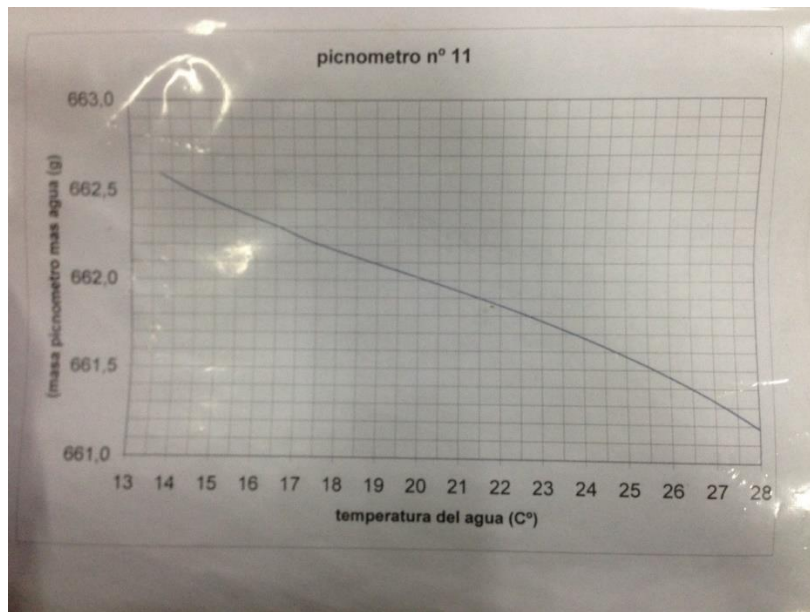


**Figura 9: Ensayo picnómetro (Fuente: Elaboración propia)**





**Figura 10: Ensayo picnómetro (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 11: Curva de calibración picnómetro (Fuente: elaboración propia)**

## Método Porchet

El método Porchet consiste en excavar en el suelo un orificio cilíndrico de profundidad y radio constante a través del cual se mide el descenso del nivel de agua dentro del pozo en función del tiempo. Todo esto a través de la siguiente expresión:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \cdot \ln \left( \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \right) \quad (4)$$

Donde, R= Radio del pozo

T<sub>2</sub>= tiempo correspondiente a la segunda medición

T<sub>1</sub>= tiempo correspondiente a la primera medición

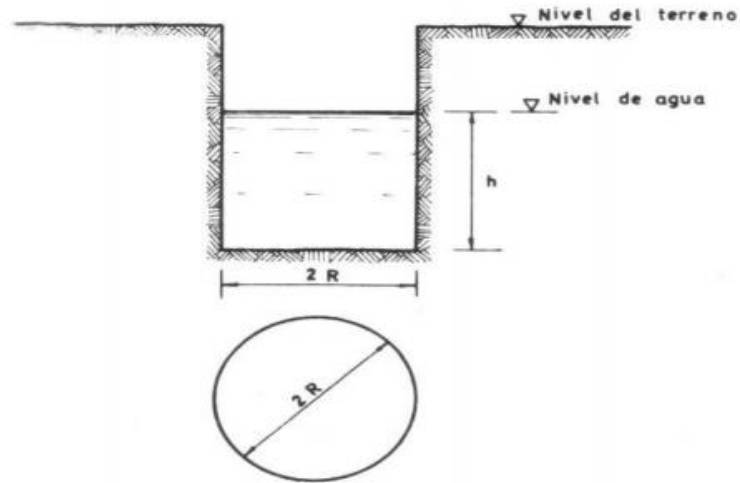
H<sub>1</sub>= Altura correspondiente a la primera medición

H<sub>2</sub>= Altura correspondiente a la segunda medición

Por lo tanto, para medir el valor de f, basta con medir los pares de valores (h<sub>1</sub>,t<sub>1</sub>) y (h<sub>2</sub>,t<sub>2</sub>) de forma que t<sub>2</sub> y t<sub>1</sub> no difieran demasiado para suponer una infiltración constante y posteriormente evaluarlo en la ecuación anterior.

Todo el desarrollo de este ensayo se encuentra en el **[Anexo B]**

La siguiente figura representa de manera esquemática el sistema de infiltración utilizado.



**Figura 12: Esquema método Porchet**

(Fuente: <http://documents.tips/documents/ensayo-de-porchet.html>)

**PORCHET C-1**

**IDENTIFICACIÓN ITEM DE ENSAYO**

Muestra : C-1  
 Material (inspección Visual) : Arena Limosa

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
18	0	200	180	560	0		
15,5	5	200	155	510	5	112,23127	0,00311754
14	10	200	140	480	5	72,7495462	0,00202082
12,6	15	200	126	452	5	72,1247089	0,00200346
11,3	20	200	113	426	5	71,0914003	0,00197476
10	25	200	100	400	5	75,569759	0,00209916
9	30	200	90	380	5	61,5519533	0,00170978
						77,5531062	0,00215425

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	Mm	mm	min	mm/hr	cm/s
15	0	200	150	500	0	-	-
12,2	5	200	122	444	5	142,54	0,003959
11	10	200	110	420	5	66,68	0,001852
9,9	15	200	99	398	5	64,56	0,001793
9	20	200	90	380	5	55,54	0,001543
8,5	25	200	85	370	5	32,00	0,000889
7,8	30	200	78	356	5	46,29	0,001286
						67,94	0,001887

Altura(cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
18	0	200	180	560	0		
12,5	5	200	125	450	5	262,427041	0,00728964
9,8	10	200	98	396	5	153,400046	0,00426111
7,6	15	200	76	352	5	141,339643	0,0039261
6	20	200	60	320	5	114,372216	0,00317701
4,4	25	200	44	288	5	126,432619	0,00351202

3	30	200	30	260	5	122,734619	0,00340929
						153,451031	0,00426253

**PORCHET C-2**

**IDENTIFICACIÓN ITEM DE ENSAYO**  
 Muestra : C-2 (inspección Visual) : Arena Limosa

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
20	0	200	200	600	0		
18,1	5	200	181	562	5	78,5133664	0,00218093
16,2	10	200	162	524	5	84,0121987	0,00233367
14,5	15	200	145	490	5	80,5035519	0,00223621
12,2	20	200	122	444	5	118,296994	0,00328603
11,3	25	200	113	426	5	49,6622594	0,00137951
9	30	200	90	380	5	137,121712	0,00380894
						91,3516805	0,00253755

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
18	0	200	180	560	0		
16,3	5	200	163	526	5	75,1626852	0,00208785
14	10	200	140	480	5	109,818131	0,0030505
11,9	15	200	119	438	5	109,880632	0,00305224
10	20	200	100	400	5	108,905236	0,00302515
9,4	25	200	94	388	5	36,551049	0,00101531
8,7	30	200	87	374	5	44,0994507	0,00122498
						80,7361973	0,00224267

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
18	0	200	180	560	0		
15,5	5	200	155	510	5	112,23127	0,00311754
14	10	200	140	480	5	72,7495462	0,00202082
12,6	15	200	126	452	5	72,1247089	0,00200346

11,3	20	200	113	426	5	71,0914003	0,00197476
10	25	200	100	400	5	75,569759	0,00209916
9	30	200	90	380	5	61,5519533	0,00170978
						77,5531062	0,00215425

**PORCHET C-3**

**IDENTIFICACIÓN ÍTEM DE ENSAYO**

Muestra : C-3  
 Material (inspección Visual) : Arena Limosa

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
20	0	200	200	600	0		
17,3	5	200	173	546	5	113,172815	0,00314369
15,4	10	200	154	508	5	86,5650338	0,00240458
12,6	15	200	126	452	5	140,159121	0,00389331
11,8	20	200	118	436	5	43,2479238	0,00120133
10,1	25	200	101	402	5	97,4281857	0,00270634
9	30	200	90	380	5	67,5370031	0,00187603
						91,3516805	0,00253755

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
19	0	200	190	580	0		
17,8	5	200	178	556	5	50,7117711	0,00140866
16,1	10	200	161	522	5	75,7208476	0,00210336
15,3	15	200	153	506	5	37,3571023	0,0010377
13,8	20	200	138	476	5	73,3425781	0,00203729
11,9	25	200	119	438	5	99,8387326	0,0027733
10,4	30	200	104	408	5	85,1420832	0,00236506
						70,3521858	0,00195423

Altura del agua (cm)	tiempo (s)	R	H	2h+R	t2-t1	f	
H(cm)	t (min)	mm	mm	mm	min	mm/hr	cm/s
18	0	200	180	560	0		

16,3	5	200	163	526	5	75,1626852	0,00208785
15	10	200	150	500	5	60,8317372	0,00168977
13,5	15	200	135	470	5	74,2504845	0,00206251
12,2	20	200	122	444	5	68,2897587	0,00189694
11	25	200	110	420	5	66,6838214	0,00185233
9,2	30	200	92	384	5	107,53459	0,00298707
						75,4588462	0,00209608



**Figura 13: Aplicación método Porchet (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 14: Aplicación método Porchet (Fuente: Elaboración Propia)**

**Permeámetro de carga variable**

Para la obtención del coeficiente de permeabilidad mediante el permeámetro de carga variable se utiliza un cilindro de aproximadamente 100 mm de diámetro cuyo extremo superior e inferior consta de una piedra porosa unida a un material de tipo impermeable que evita el escape de agua por los bordes. En este cilindro se introduce la muestra de suelo la cual se satura completamente eliminando el contenido de aire presente dentro de este. Dos maneras de obtener el coeficiente de permeabilidad son: registrar la altura de agua en distintos tiempos mediante una columna graduada unida al recipiente que contiene la muestra de suelos o bien para una altura de agua determinada se determina el tiempo que demora en producirse el gradiente hidráulico. Luego se determina el coeficiente de permeabilidad por medio de la siguiente expresión:

$$k = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (5)$$



Donde:  $a$ = área de la sección transversal del tubo de carga,  $\text{cm}^2$

$L$ = Longitud de la muestra,  $\text{cm}$

$A$ = área de la sección transversal de la muestra de suelo,  $\text{cm}^2$

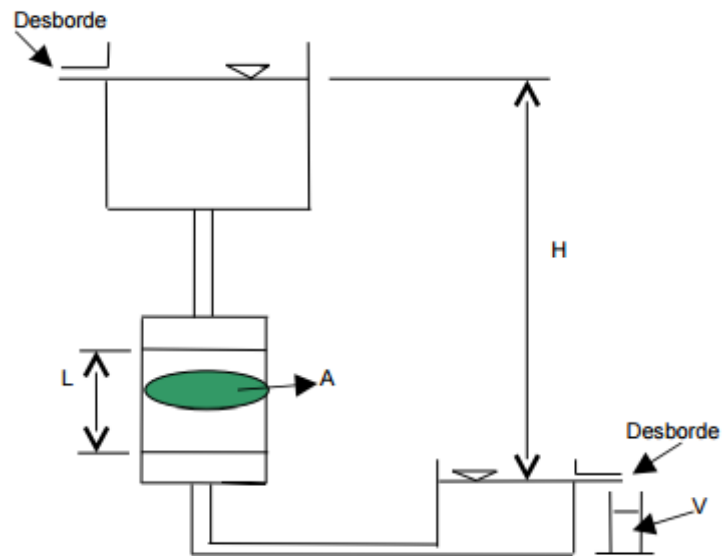
$t$ = Tiempo transcurrido,  $\text{seg}$

$h_0$ = Altura inicial de la columna de agua por encima del orificio de salida, $\text{cm}$

$h_f$ = Altura final de la columna de agua por encima del orificio de salida, $\text{cm}$

$K$ = Coeficiente de permeabilidad en  $\text{cm}/\text{seg}$

En la siguiente figura se puede observar esquemáticamente el procedimiento de ensayo.



**Figura 15: Esquema permeámetro carga variable**  
(Fuente: <http://fisica.laguia2000.com>)

El desarrollo de este ensayo se realizó en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad de Concepción y en el laboratorio de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

**PERMEÁMETRO CARGA VARIABLE**

Concepción, Diciembre de 2016

**IDENTIFICACIÓN ITEM DE ENSAYO**

Muestra : C-1;C-2;C-3  
 Material (inspección Visual) : Arena Limosa

Permeámetro C.V- Calicata 1	
Área S.T tubo de carga (a), cm <sup>2</sup>	0,93
Área S.T muestra de suelo (A), cm <sup>2</sup>	80,91
Longitud de la muestra (cm)	11,65

Altura (h1), cm	Altura (h2), cm	Tiempo, seg	K (cm/seg)
21,67	16,67	154	0,000228094
21,67	16,67	168	0,000209086
21,67	16,67	148	0,000237341
			0,000224841

Permeámetro C.V- Calicata 2	
Área S.T tubo de carga (a), cm <sup>2</sup>	0,502
Área S.T muestra de suelo (A), cm <sup>2</sup>	95,03
Longitud de la muestra (cm)	18

Altura (h1), cm	Altura (h2), cm	Tiempo, seg	K (cm/seg)
68	66	6,7	0,00042367
68	64	15,1	0,000381758
68	62	23,9	0,000367506
68	60	33,8	0,000352107
68	58	45,5	0,000332413
			0,000371491

Permeámetro C.V- Calicata 3	
Área S.T tubo de carga (a), cm <sup>2</sup>	0,502
Área S.T muestra de suelo (A), cm <sup>2</sup>	95,03
Longitud de la muestra (cm)	18

Altura (h1), cm	Altura (h2), cm	Tiempo, seg	K (cm/seg)
68	66	11,67	0,000243238
68	64	23,78	0,000242411
68	62	36,71	0,000239264
68	60	53,14	0,00022396
68	58	73,23	0,000206538
			0,000231082



**Figura 16: Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (Fuente: Elaboración propia)**





**Figura 17: Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 18: Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad de Concepción (Fuente: Elaboración propia)**

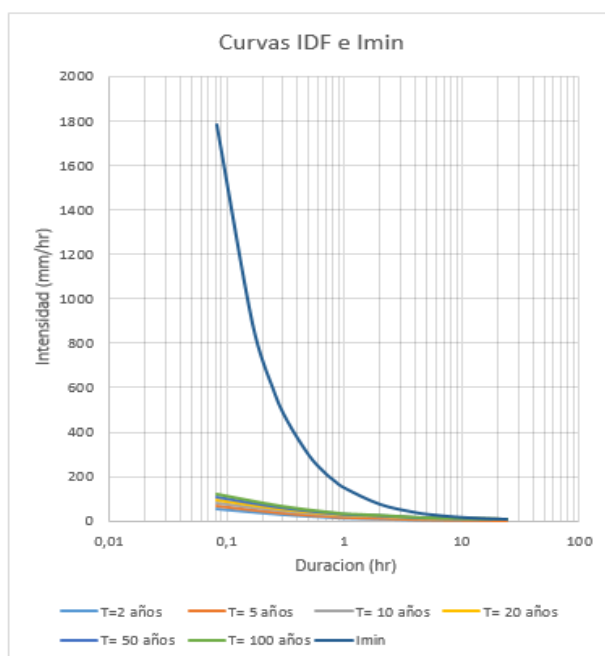


**Figura 19: Ensayo con permeámetro de carga variable, laboratorio de la Universidad de Concepción (Fuente: Elaboración propia)**

## ANEXO C: Permeabilidad límite (Klim) e intensidad límite de precipitaciones.

### Intersección curva IDF- curva intensidad mínima

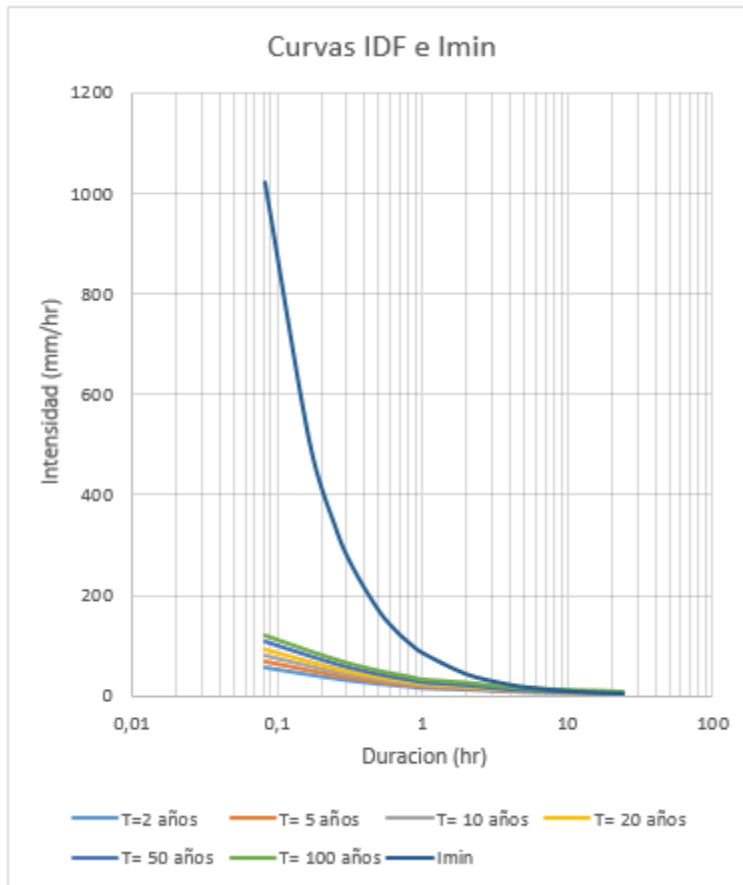
A continuación se presenta la intersección de las curvas de intensidad mínima con curvas IDF, según modelo de D.Pradel junto a sus respectivos valores de duración y precipitación límite para cada periodo de retorno.



**Figura 20: Intersección curvas IDF e intensidad mínima  $Z_w = 50$  cm C-1 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
$Z_w = 50$ cm	$S = 11$ cm	$\mu = 0,42$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	20,7	7,38	152,7
50	23,8	6,42	152,9
20	*	*	*
10	*	*	*
5	*	*	*
2	*	*	*

**Tabla 1: Duraciones e intensidades límite  $Z_w = 50$  cm C-1 (Fuente: Elaboración propia)**

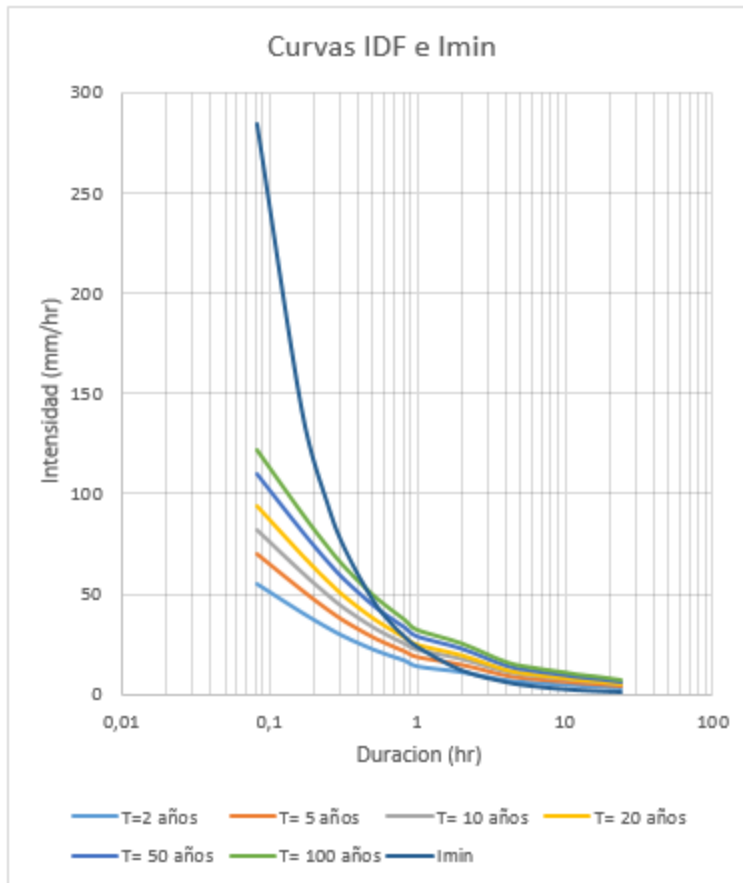


**Figura 21: Intersección curvas IDF e intensidad mínima Zw= 30 cm C-1 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 30 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,42$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	6,89	12,93	89,12
50	8,47	10,52	89,10
20	11,35	7,85	89,09
10	14,9	5,98	89,11
5	20,84	4,27	88,98
2	*	*	*

**Tabla 2: Duraciones e intensidades límite Zw=30 cm C-1 (Fuente: Elaboración propia)**



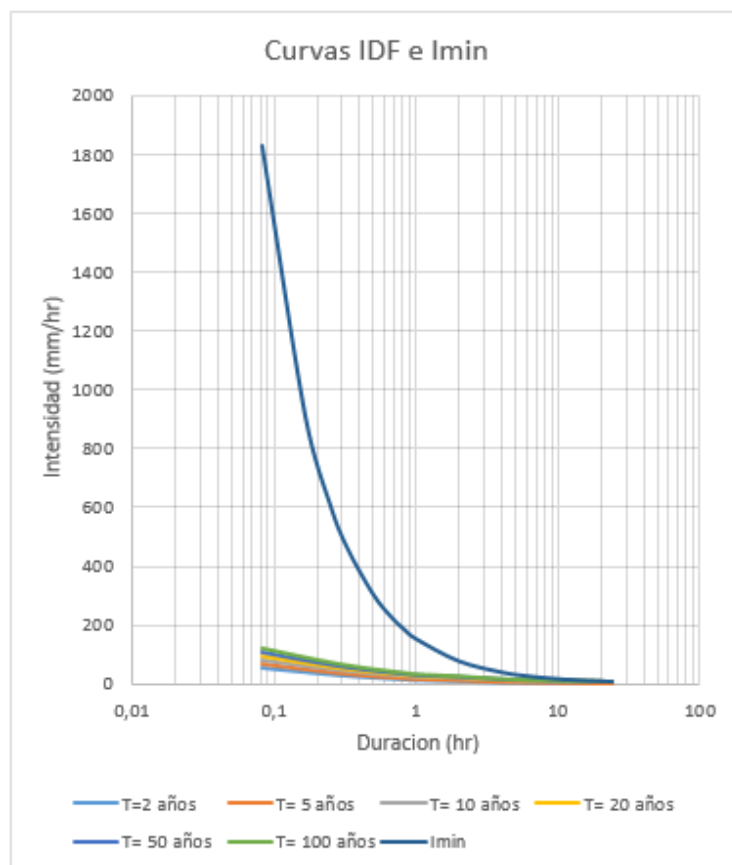


**Figura 22: Intersección curva Imin e IDF Zw= 10 cm C-1 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 10 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,42$	
P.R (años)	Duración (hr)	intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	0,53	47,92	25,39
50	0,65	39,07	25,39
20	0,89	28,53	25,42
10	1,18	21,52	25,39
5	1,62	15,6	25,2
2	2,87	8,8	25,25

**Tabla 3: Duraciones e intensidades límite Zw=10 cm C-1 (Fuente: Elaboración propia)**

(Fuente:

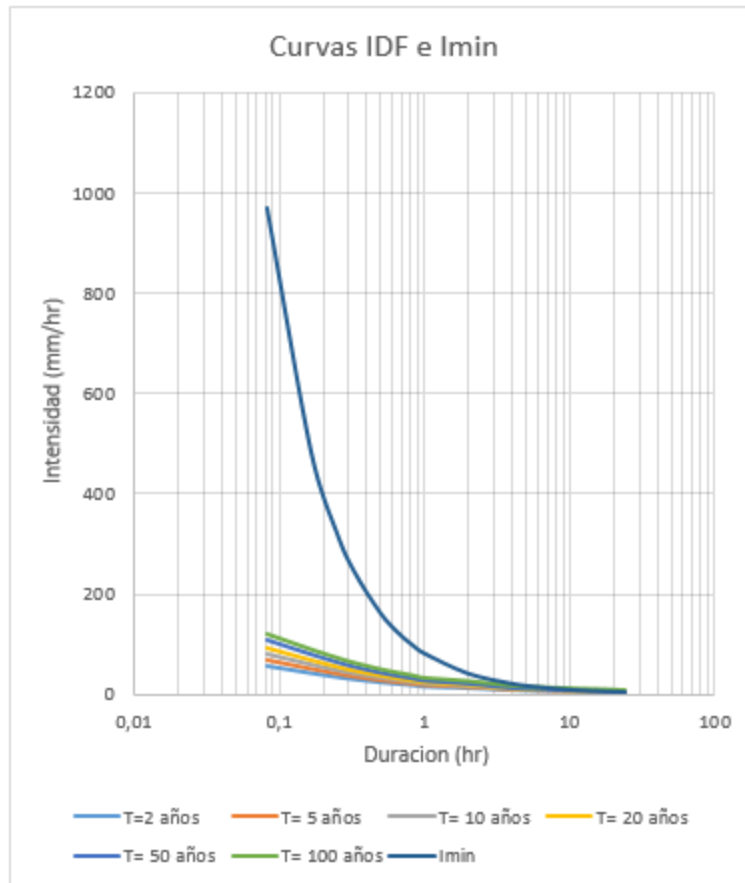


**Figura 23: Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-2 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 50 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,44$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	19,46	7,61	148,2
50	23,88	6,20	148,05
20	*	*	*
10	*	*	*
5	*	*	*
2	*	*	*

**Tabla 4: Duraciones e intensidades límite Zw=50 cm C-2 (Fuente: Elaboración propia)**

(Fuente: Elaboración propia)

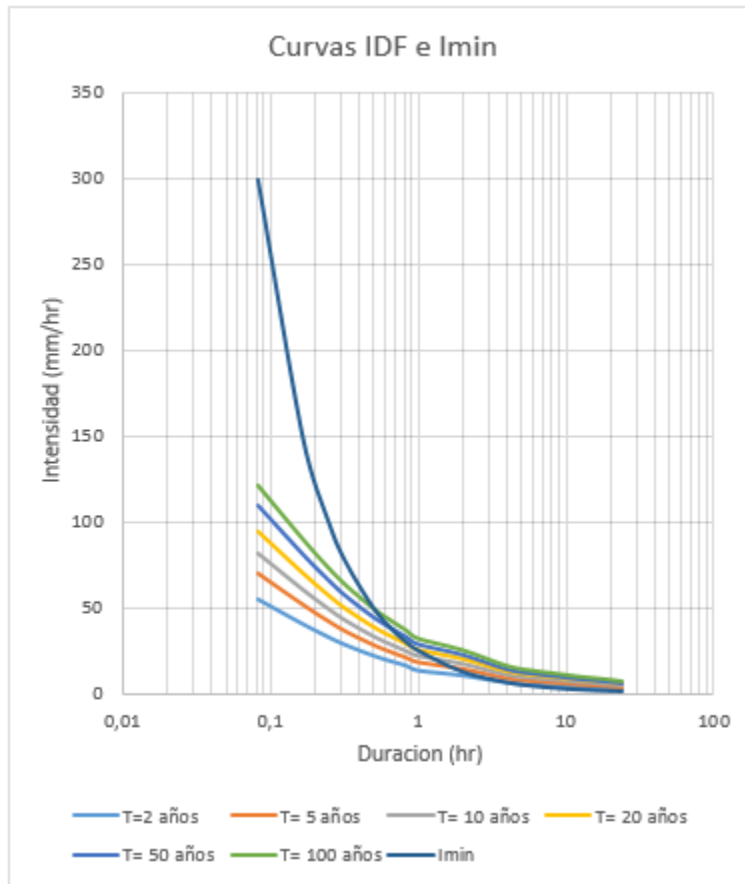


**Figura 24: Intersección curva Imin e IDF Zw= 30 cm C-2 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 30 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,44$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7,57	12,32	93,3
50	9,3	10	93
20	12,46	7,5	93,75
10	16,34	5,7	92,2
5	22,87	4,09	93,48
2	*	*	*

**Tabla 5: Duraciones e intensidades límite Zw=30 cm C-2 (Fuente: Elaboración propia)**

(Fuente:

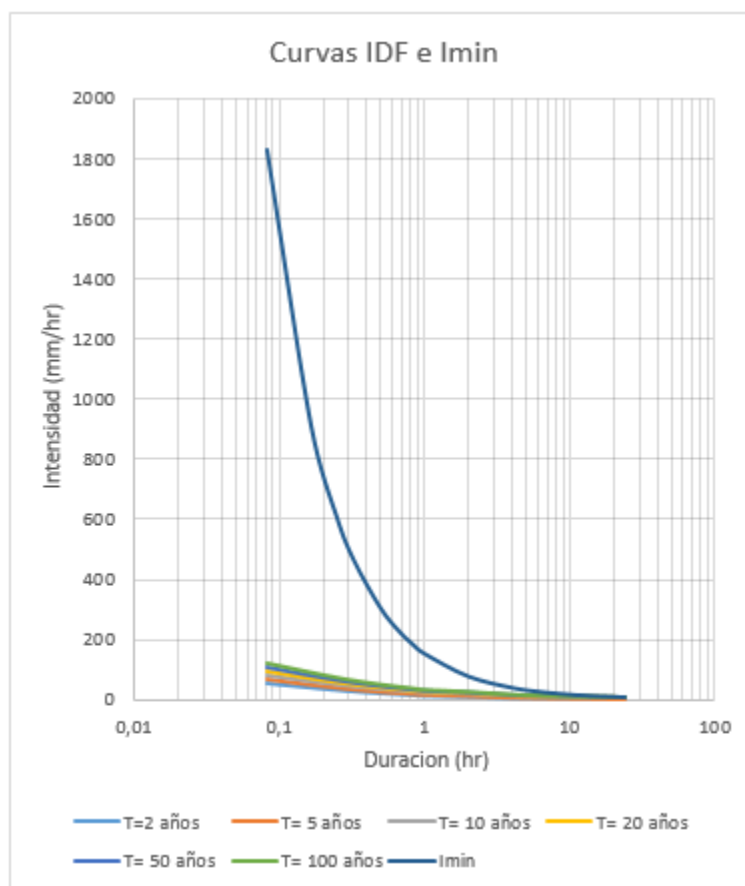


**Figura 25: Intersección curva Imin e IDF Zw= 10 cm C-2 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 10 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,44$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	0,58	45,8	26,56
50	0,72	36,9	26,5
20	0,97	27,42	26,19
10	1,29	20,6	26,78
5	1,78	14,94	26,59
2	3,16	8,41	26,88

**Tabla 6: Duraciones e intensidades límite Zw=10 cm C-2 (Fuente: Elaboración propia)**

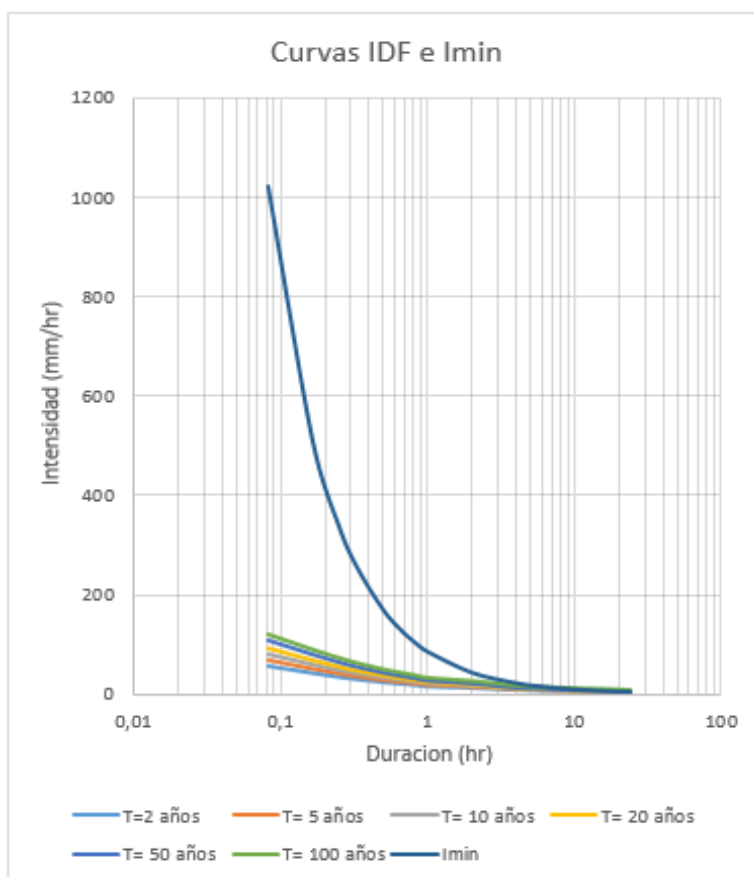
(Fuente:



**Figura 26: Intersección curva Imin e IDF Zw= 50 cm C-3 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 50 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,43$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	20,5	7,41	151,7
50	23,9	6,36	152
20	*	*	*
10	*	*	*
5	*	*	*
2	*	*	*

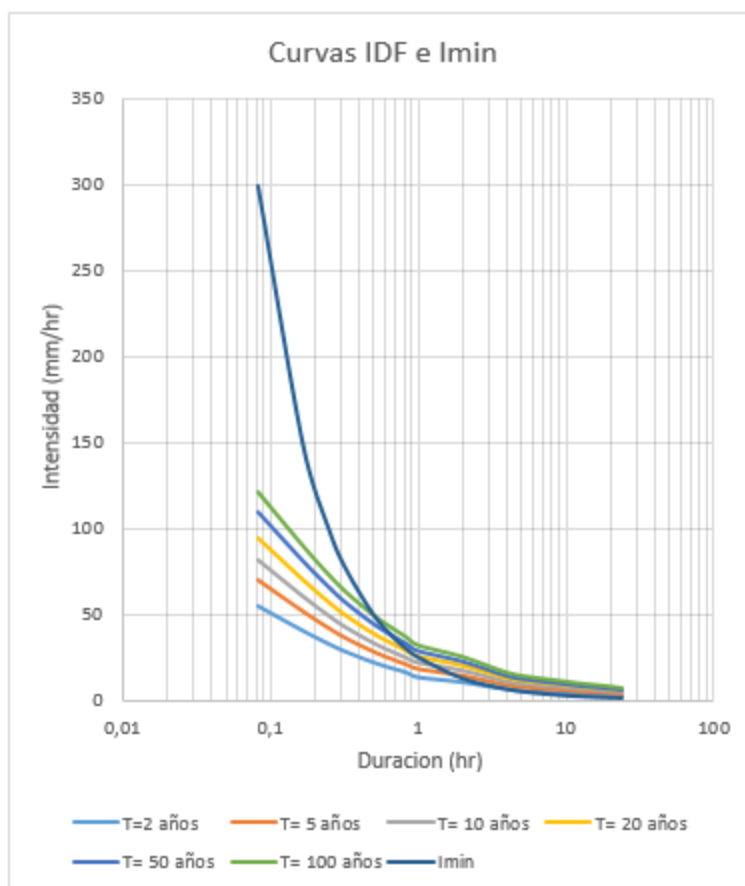
**Tabla 7: Duraciones e intensidades límite Zw=50 cm C-3 (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 27: Intersección curva Imin e IDF Zw= 30 cm C-3 (Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 30 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,43$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7,23	12,62	91,09
50	8,89	10,26	91,21
20	11,89	7,66	91,07
10	15,63	5,83	90,48
5	21,86	4,17	91,15
2	*	*	*

**Tabla 8: Duraciones e intensidades límite Zw=30 cm C-3 (Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 28: Intersección curva Imin e IDF Zw= 10 cm C-3  
(Fuente: Elaboración propia)**

Intensidad Límite Precipitaciones			
Zw= 10 cm	S= 11 cm	$\mu= 0,43$	
P.R (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	0,56	46,55	26,07
50	0,69	37,78	25,9
20	0,93	28,03	25,22
10	1,24	21,02	26,06
5	1,71	15,24	25,84
2	3,03	8,6	26,05

**Tabla 9: Duraciones e intensidades límite Zw=10 cm C-3  
(Fuente: Elaboración propia)**

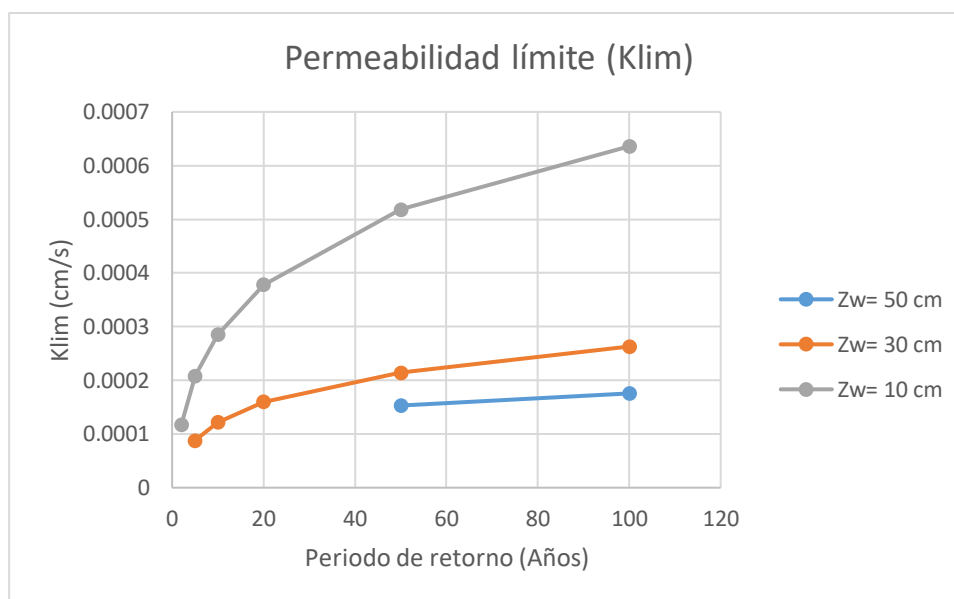
(Fuente:

### Permeabilidad límite (Klim)

En la siguiente sección se presentan los gráficos de permeabilidad límite para cada uno de los puntos de muestreo con sus respectivos valores para cada periodo de retorno.

Calicata 1	Klim (cm/s)		
	Zw=50cm	Zw=30cm	Zw=10cm
100	0,0001756	0,000263	0,000636
50	0,000153	0,000214	0,000518
20	*	0,000160	0,000378
10	*	0,000122	0,000285
5	*	0,000088	0,000208
2	*	*	0,000117

**Tabla 10: Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno**  
(Fuente: Elaboración propia)

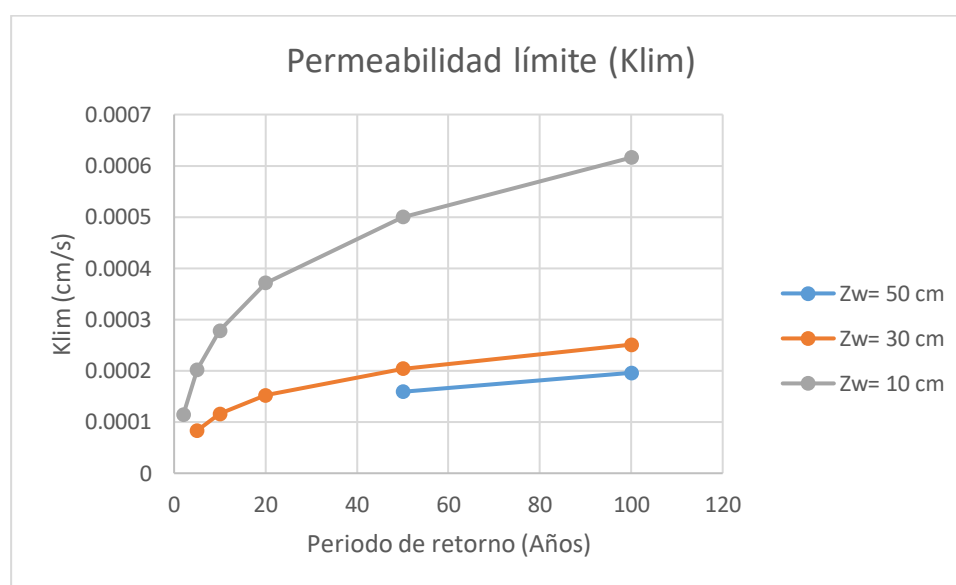


**Figura 29: Curva de permeabilidad límite para distintos periodos de retorno**  
(Fuente: Elaboración propia)



Calicata 2	Klim (cm/s)		
P.R (años)	Zw=50cm	Zw=30cm	Zw=10cm
100	0,000196	0,000251	0,000608
50	0,000159	0,000204	0,00049
20	*	0,000152	0,000364
10	*	0,000116	0,000274
5	*	0,000083	0,000198
2	*	*	0,000112

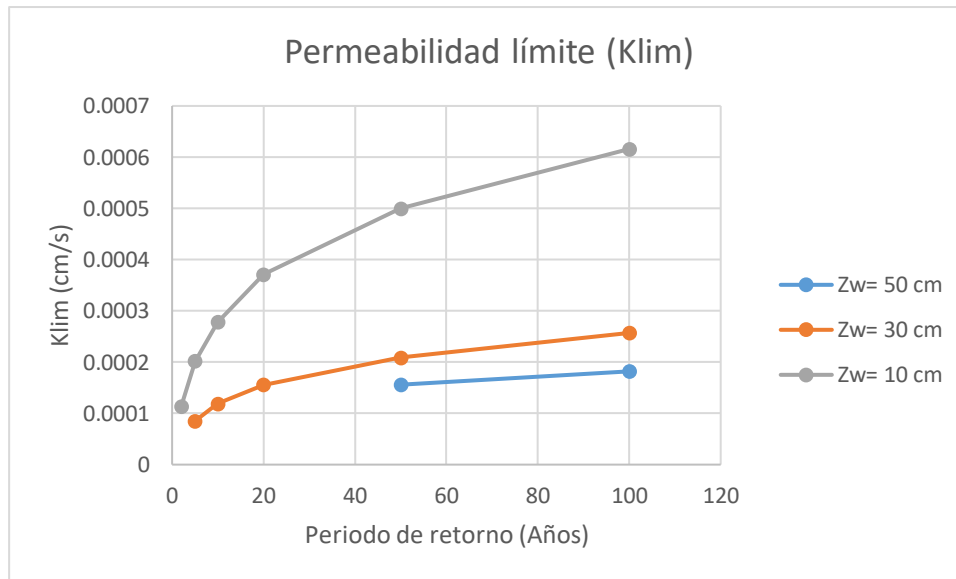
**Tabla 11: Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno  
(Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 30: Curva de permeabilidad límite para distintos periodos de retorno  
(Fuente: Elaboración propia)**

Calicata 3	Klim (cm/s)		
	Zw=50cm	Zw=30cm	Zw=10cm
100	0,000182	0,000257	0,000616
50	0,000156	0,000209	0,0005
20	*	0,000156	0,000371
10	*	0,000119	0,000278
5	*	0,000085	0,000202
2	*	*	0,000114

**Tabla 12: Permeabilidad límite para distintos periodos de retorno  
(Fuente: Elaboración propia)**



**Figura 31: Curva de permeabilidad límite para distintos periodos de retorno  
(Fuente: Elaboración propia)**