

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL

Profesor Patrocinante: Ing. Carmen González Labbé

Profesores Comisión: Mg. Verónica Lazcano

Mg. Gilda Espinoza

**“PROPOUESTA DE UMBRAL FISICO DE
PRECIPITACION PARA LA PREDICCIÓN DE
DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN LA PROVINCIA DE
CONCEPCION”**

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

CRISTIAN ALEXIS TRUJILLO MALDONADO

Concepción, Octubre de 2015

***Dedicado a mi familia, quienes me acompañaron
y apoyaron durante mi formación personal y profesional.***

Nomenclatura

μ = Porosidad.

S o ψ = Succión del frente húmedo.

τ = Resistencia al corte.

γ_w = Unidad de peso del agua.

γ_t = Peso específico total

c' = Cohesión efectiva.

C = cohesión total.

k = Permeabilidad del suelo.

k_s = Permeabilidad saturada del suelo.

z_w = Profundidad del frente húmedo desde la superficie del suelo.

T = Duración de precipitación.

I = Intensidad de precipitación.

α = Ángulo del talud.

Fs = Factor de seguridad.

σ_n = Tensión normal.

u_a = Presión de aire de poros.

u_w = Presión de agua de poros.

Φ' = Ángulo de fricción.

$u_a - u_w$ = Succión matricial.

$\sigma_n - u_a$ = Tensión normal de red.

Θ = Contenido volumétrico de agua normalizada.

Θ_w = Contenido volumétrico de agua en cualquier succión matricial.

i = Tasa de infiltración..

FEA = Análisis de elementos finitos.

SWCC = Curva característica de agua en el suelo (Curva de retención de agua).

Índice General

Nomenclatura.....	1
CAPITULO I: INTRODUCCION.	3
1.1.- Objetivos.....	4
CAPITULO II: REVISION BIBLIOGRAFICA.	5
2.1.- Variables involucradas en los movimientos en masa.....	5
2.2.- Efectos de la precipitación sobre taludes.	5
2.2.1.- Humedad superficial	6
2.2.2.- Infiltración.....	6
2.2.3.- El flujo no-saturado.....	7
2.2.4.- El flujo saturado	7
2.4.- Umbrales de precipitación en la predicción de movimientos en masa.	8
2.5.- Métodos físicos para determinar umbrales de precipitación.....	9
2.5.1.- Efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes homogéneos. D. Pradel y G. Raad, 1991.....	9
2.5.2.- Influencia de la humedad inducida por lluvia sobre la estabilidad de taludes en suelos erosionados, J. Kim y otros, 2004.	13
2.5.3.- Un método simple para analizar la infiltración en los taludes de suelos no saturados. K. Gavin y J. Xue, 2007	14
CAPITULO III: METODOLOGIA.	17
3.1.- Descripción de la Provincia de Concepción.	18
3.2.- Área de estudio.	19
3.3.- Precipitación.	20
3.4.- Parámetros del suelo.	21
CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS.....	23
4.1.- Desarrollo Metodología.	23
4.2.- Definición de umbral físico de precipitación para la provincia de Concepción.	26
4.3.- Influencia de la porosidad y del frente húmedo en el cálculo del umbral de precipitación.	28
4.4.- Umbral empírico de precipitación.	29
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	31
6.1.- Conclusiones	31
6.1.- Recomendaciones	32
Bibliografía	33

PROPUESTA DE UMBRAL FÍSICO DE PRECIPITACIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN

Autor: Cristian Alexis Trujillo Maldonado

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío – Bío

ctrujill@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Carmen Gloria González Labbé

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío – Bío

cgonzal@ubiobio.cl

RESUMEN

Los deslizamientos de tierra inducidos por lluvia son procesos más comunes de lo que se cree. Un estudio realizado a nivel nacional destacó que en la zona central de Chile, durante los meses que comprende el invierno, se presentan por lo menos tres veces más deslizamientos que aquellos meses que son considerados más secos. La potencialidad que presentan los suelos que constituyen la provincia de Concepción a ser afectados por agentes externos aumenta cuando intervienen las actividades antrópicas sobre los cerros y laderas naturales. Esto debido a que el suelo por lo general queda desprotegido y permite que la precipitación infiltre dentro del talud, resultando en un aumento de la presión de poros o en una reducción de la succión en el suelo. Lo que a su vez, se ve reflejado en una disminución de la resistencia al corte generando una potencial superficie de falla. Numerosos investigadores han estudiado el tema de las amenazas de los deslizamientos proponiendo métodos físicos para la determinación de umbrales de precipitación, con el fin de predecir este tipo de desastre. En el presente informe, se evaluaron estos métodos y en base a las variables que afectan la estabilidad de los taludes, se aplicó una metodología, resultando para los tipos de suelos y régimen de lluvias presentes en la provincia de Concepción, umbrales de precipitación del orden de 98.6mm para arenas y 136.4 para arcillas.

Palabras clave: Succión, Umbral Precipitación, Deslizamiento Tierra.

PROPOSAL OF PHYSICAL THRESHOLD OF RAINFALL FOR THE PREDICTION OF LANDSLIDE IN THE CONCEPCION PROVINCE

Author: Cristian Alexis Trujillo Maldonado

Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío – Bío

ctrujill@alumnos.ubiobio.cl

Teacher Guide: Carmen González Labbé

Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío – Bío

cgonzal@ubiobio.cl

ABSTRACT

The landslides induced by rainfall are process more common than believed. A study realized at national level highlighted that in the central zone of Chile, during the winter months, they were presented at least three times more landslides that those months considered drier. The potentiality of the soils which form the province of Concepción to be affected by external agents' increases when human activities on the natural hills and slopes involved. This is due that in general the soil remains unprotected and it allows the rainfall infiltration inside of the slope, resulting in a increases of the pores pressure or a decreases of the suction in the soil. Which in turn, it is reflected in a decrease of the shear strength causing a potential failure surface. Numerous researchers have studied the issue of the threats of the landslides proposing physical methods for the determination of thresholds precipitation, in order to predict such disasters. In the present paper, these methods were evaluated and based on the variables that affecting the stability of the slopes, a methodology was applied and resulting to soil types and rainfall patterns present in the province of Concepción, thresholds rainfall of the order of 98.6mm for sands and 136.4mm for clays.

Keywords: Suction, Thresholds rainfall, Landslides.

CAPITULO I: INTRODUCCION.

Las situaciones de mayor complejidad que se producen después de un evento de lluvia son los movimientos de masa ya que estos amenazan con caer sobre las casas y caminos. Existen distintos tipos de movimientos en masa, algunos son lentos, pequeños e imperceptibles, en cambio otros involucran grandes volúmenes de material y alcanzan altas velocidades con un gran poder destructivo, además las consecuencias son devastadoras tales como pérdidas materiales, económicas y en el peor de los casos pérdidas de vida humana. Razón por la cual el estudio de la amenaza por movimientos de tierra y la capacidad de predecir dichos movimientos ha sido un tema de gran interés para la comunidad científica. En la mayoría de los casos los deslizamientos de tierra inducidos por lluvia pueden ser generados a partir de la activación de dos mecanismos, en un primer caso se debe por la infiltración del agua a las capas subterráneas o por un cambio en la profundidad del frente húmedo, lo que se ve reflejado como una reducción en la resistencia al corte del suelo y por otra parte debido a la erosión causada en la superficie por el flujo de lodos, lo que tiene lugar cuando por intervención del hombre son deforestadas laderas o se realizan cortes en los cerros. Las técnicas que han sido desarrolladas para evaluar la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa consisten en métodos basados en la predicción de deslizamientos como son los umbrales por precipitación de lluvia. Los umbrales se definen como el nivel máximo y mínimo de alguna cantidad necesaria para que un proceso tenga lugar o se produzca un cambio de estado, bajo este concepto es posible describir los umbrales críticos de precipitación, en los cuales los límites superior e inferior del umbral dan cuenta de la ocurrencia o no de un evento. Las aproximaciones existentes para evaluar valores de umbral por precipitación se dividen en métodos empíricos y en métodos físicos. Los métodos empíricos o estadísticos están basados en datos históricos de lluvia y de movimientos en masa y relacionan la ocurrencia del evento con la intensidad, la duración y la acumulación de la lluvia. Por otro lado los métodos geomecánicos o físicos consideran las características geotécnicas e hidrológicas y relacionan los conceptos de lluvia, infiltración, presiones de poros y estabilidad de taludes. En el desarrollo de este estudio se trabajarán los métodos físicos para así poder definir una propuesta de umbral crítico de precipitación para el pronóstico de movimientos en masa en la provincia de Concepción, en la cual se tomarán como base investigaciones anteriores desarrolladas por exalumnos de la Universidad del Bío-Bío relacionadas con los umbrales de precipitación y con los taludes que se encuentran en la provincia.

1.1.- Objetivos.

Objetivo general:

- Proponer umbral físico de precipitación para la predicción de movimientos en masa de la provincia de Concepción.

Objetivos específicos:

- Seleccionar los métodos físicos pertinentes para su aplicación en la provincia de Concepción.
- Caracterizar y sectorizar los suelos de la provincia de Concepción.
- Evaluar cada método en base a valores referenciales de los parámetros característicos del suelo de Concepción.
- Establecer un umbral físico de precipitación para la provincia de Concepción

CAPITULO II: REVISION BIBLIOGRAFICA.

2.1.- Variables involucradas en los movimientos en masa.

Para que se puedan generar los movimientos en masa sobre una ladera o talud es posible reconocer dos factores desencadenantes, los cuales, para que el evento tenga lugar deben trabajar de manera conjunta. De esta forma, los factores que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos se denominan, variables estáticas o condicionantes y variables dinámicas o detonantes. Entre los primeros se incluyen básicamente las propiedades de los suelos, la topografía y todas las actividades de carácter antrópico tales como deforestación, construcción de obras civiles, etc. las que contribuyen a la susceptibilidad de los taludes y definen la distribución espacial de los movimientos en masa. En tanto, dentro de las variables dinámicas se encuentran las precipitaciones y los procesos hidrológicos los cuales caracterizan el patrón temporal de los movimientos en masa.

La combinación de estos factores tiene como consecuencia que los suelos experimenten diferentes cambios geométricos y físicos debido a la erosión e infiltración. Procesos que, como resultado final tienen la degradación suelos elevando así el riesgo de este tipo de desastres como son avalanchas y deslizamientos de tierra.

2.2.- Efectos de la precipitación sobre taludes.

Una vez que la precipitación entra en contacto con el talud, es posible describir el “ciclo hidrológico” que recorre el agua lluvia sobre la pendiente, en el cual, una parte de la precipitación se infiltra en el suelo subyacente y la otra avanza por la superficie en forma de escorrentía. Siendo el flujo subterráneo y por consiguiente los cambios de volumen de agua, los procesos a los que más atención se les debe atribuir, debido a que son críticos en la estabilidad de los taludes.

El comportamiento de los flujos subterráneos con respecto a la infiltración de las aguas lluvias es diferente de acuerdo al tipo de talud, la formación geológica y las condiciones ambientales. A continuación se describirán los efectos que se generan una vez que la precipitación entra en contacto con el suelo y se generan los flujos subterráneos.

2.2.1.- Humedad superficial

La humedad del suelo es una variable considerable en el ciclo hidrológico ya que define factores tales como los porcentajes de escorrentía e infiltración, factores decisivos en la estabilidad de taludes y laderas. La humedad superficial está controlada principalmente por las características topográficas de los taludes, el tipo de suelo, el nivel de erosión y el tipo de clima predominante.

2.2.2.- Infiltración

La infiltración se define como el paso del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo o roca por los poros de la masa de suelo. Un proceso que depende generalmente de la naturaleza del suelo, la condición de la superficie, la cantidad de aire y agua inicial presente en el suelo y de la cantidad de agua disponible para infiltrar, factor relacionado con la intensidad de la lluvia. A medida que el agua lluvia se infiltra desde la superficie, las capas superiores del suelo se van humedeciendo de arriba hacia abajo, alterando gradualmente su humedad. El aumento de humedad en el suelo, incluso en pequeñas cantidades, puede inducir cambios drásticos en su comportamiento mecánico como la resistencia, deformación, permeabilidad y durabilidad. De aquí se pueden desprender dos condiciones de borde diferentes, la primera describe una superficie de talud inundada donde la intensidad de la lluvia es mucho mayor que la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo, en este caso, solo una parte de la lluvia alcanza a infiltrarse y el resto pasa a ser escorrentía, por lo tanto, se puede concluir que la superficie del terreno se encuentra totalmente saturada. En la segunda condición, la intensidad de la lluvia es menor que el flujo de agua que se puede infiltrar en el talud, por esta razón, la infiltración queda controlado por la intensidad de la lluvia, por lo tanto, se estaría hablando de un suelo no-saturado.

2.2.3.- El flujo no-saturado

Al infiltrarse el agua en el suelo, inicialmente, se genera un frente húmedo que avanza de forma paralela a la superficie del terreno. La velocidad a la que avanza el frente húmedo está relacionada con la permeabilidad del suelo, el grado de saturación y de la porosidad del material. Dependiendo del grado de meteorización el frente húmedo puede alcanzar una superficie crítica en poco tiempo, el cual, desciende en sentido vertical debido a la fuerza de gravedad hasta que se encuentra con el nivel freático o con algún material impermeable y con esto satura los suelos a su paso, eliminando la succión o cohesión aparente, factores que producen el estado de no-saturación. Por lo tanto, otra variable que describe el comportamiento de los suelos no-saturados es la llamada succión, la cual, según Freedlund (1995) se define como la presión manométrica negativa, que en términos físicos representa la capacidad del suelo de absorber agua desde la superficie. Esta reducción a su vez disminuye la resistencia al corte de los suelos ocasionando fallas en los taludes sobre todo aquellos conformados por materiales de granos finos.

2.2.4.- El flujo saturado

La infiltración unida a fenómenos de transporte interno de agua produce un régimen de aguas subterráneas. La conducción interna de agua puede ser a través de una formación permeable o a través de fallas. Al estudiar el comportamiento de las aguas subterráneas, su almacenamiento, sus movimientos y su eventual afloramiento, juegan un papel fundamental consideraciones de orden geológico, tanto referentes a características de superficie como las formaciones más profundas. En primer lugar, han de considerarse los tipos de las unidades de suelos tales como arena, pues por su permeabilidad, estas unidades son susceptibles de transportar agua a los taludes. Otras estructuras geológicas que facilitan la ocurrencia de deslizamientos de tierra son los materiales impermeables que impiden el paso de las corrientes de agua subterránea formando acumulaciones de agua, direccionando las corrientes o sirviendo de base para la formación de acuíferos. Es un caso común en formaciones residuales, que un talud posea capas alternadas de materiales permeables y casi impermeables que generan concentraciones de flujo sobre ciertos planos que pueden ser o llegar a ser planos críticos de falla.

La presencia de capas permeables estratificadas produce un manto de agua dentro del estrato permeable sobre el suelo arcilloso, el cual produce presiones de tipo hidrodinámico que con el cambio del régimen de aguas por las lluvias y la infiltración, producen disminuciones en las presiones efectivas y por ende en la resistencia del suelo creándose una superficie de debilidad.

2.4.- Umbrales de precipitación en la predicción de movimientos en masa.

Los umbrales se definen como el nivel máximo y mínimo de alguna cantidad necesaria para que un proceso tenga lugar o se produzca un cambio de estado (White et al., 1996). Con esta definición, para el caso de umbrales críticos de precipitación definidos para la predicción de movimientos en masa, el valor mínimo del umbral corresponde al límite inferior para el cual no se registran movimientos, por el contrario, sobre valor máximo los movimientos en masa tienen un 100% de probabilidad de ocurrencia (E. Aristazabal y otros, 2010). Los umbrales de precipitación se pueden definir en dos tipos: empíricos o estadísticos y físicos o conceptuales.

Los umbrales definidos por métodos empíricos o estadísticos están basados en datos históricos de lluvias y de movimiento de masa, correlacionando la ocurrencia del evento con la intensidad, duración y acumulación de lluvia (Ramírez, 2010). Los umbrales definidos por métodos físicos están basados en modelos numéricos que incorporan el resultado de análisis hidrológicos y geotécnicos que relacionan lluvias, infiltración, presiones de poros y estabilidad de taludes; para desarrollar este tipo de umbrales se requiere información hidrológica, litológica, morfológica y las características de los suelos que controlan la activación de los movimientos en masa. Este tipo de umbral ha sido creado en el intento de modelar la estabilidad de taludes de forma confiable y más precisa que los resultados que se obtienen con umbrales empíricos, los modelos físicos proporcionan información sobre la distribución espacial de la amenaza por movimientos en masa, a diferencia de los modelos empíricos, que solamente brindan información de la distribución temporal de los movimientos en masa. La única desventaja que tiene este método de predicción es que la información que requieren debe ser muy detallada, además de conocer todas las características propias del suelo en estudio y tener un amplio conocimiento en el comportamiento de taludes parcialmente saturados.

2.5.- Métodos físicos para determinar umbrales de precipitación.

En esta sección, se describirán los métodos físicos estudiados para abordar el tema principal de la propuesta de umbral físico de precipitación en la provincia de Concepción. Para lo cual se ha tomado como antecedente la investigación realizada por la ex-alumna Constanza Tapia, trabajo que llevaba por nombre “Estados de arte de los métodos físicos para definir umbrales críticos por lluvia” y a partir del cual se seleccionaron los métodos más apropiados a desarrollar en la provincia de Concepción.

2.5.1.- Efecto de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes homogéneos. D.

Pradel y G. Raad, 1991 [Anexo 7.1].

En el sur de California, de acuerdo a sus códigos locales (“*Normas mínimas para el análisis de la estabilidad de taludes, 1978*”) la estabilidad superficial de taludes se evalúa asumiendo las condiciones de un talud infinito donde la infiltración es paralela a la cara de la pendiente. Este tipo de análisis, sugiere que las fallas superficiales tienen más probabilidades de ocurrir en taludes de arena y grava que en los compuestos por materiales finos. Como esto contradice algunas observaciones reales, esta investigación tiene como objetivo estudiar esta discrepancia y analizar la influencia de la permeabilidad en la estabilidad superficial de taludes.

Cuando la superficie del talud es afectada por fuertes lluvias, el agua que precipita comienza a infiltrar en el suelo, saturando las capas superiores, si además, el suelo superficial está sostenido sobre un material más impermeable comienza a tener lugar un flujo paralelo a la cara del talud. Condición que termina reduciendo el factor de seguridad y provocando fallas superficiales.

Antes que una falla del tipo superficial con infiltración paralela a la cara del talud ocurra, el suelo debe llegar a la saturación, los requisitos mínimos para llegar a la saturación son:

- (1) intensidad de la lluvia suficiente para exceder la razón de infiltración del material.
- (2) duración de la lluvia suficiente para saturar el talud a una profundidad z_w .

Para lo cual se utilizó un modelo simple para la infiltración basado en las leyes de Darcy, el cual fue propuesto por Green y Ampt.

De acuerdo con el modelo, fue posible obtener las ecuaciones que determinan el tiempo necesario para saturar el suelo a una determinada profundidad (T_w) y la razón de infiltración de agua en el suelo (v_i). Las condiciones y las ecuaciones que rigen infiltración y precipitaciones son presentadas en el Anexo 7.1.2. Como se mencionó anteriormente, un mecanismo de falla superficial con infiltración paralela a la cara del talud es posible si se cumplen ciertas condiciones de saturación. La primera condición requiere que la intensidad de la lluvia, I , sea mayor que la tasa de infiltración, v_i . La segunda condición requiere que la duración de la precipitación debe ser más larga que T_w . Por lo tanto, estas condiciones requieren que $T \geq T_w$ y $I \geq v_i$. Estas desigualdades proporcionan un requisito mínimo para la saturación a una profundidad z_w . Combinando las ecuaciones mencionadas, es posible relacionar la duración de la precipitación con la intensidad (I_{min}). Hay que tener en cuenta que la expresión de intensidad obtenida, no considera el efecto de la escorrentía y la evapotranspiración, por lo que serán necesarios intensidades de lluvia mucho mayor las que producirán la saturación.

Las condiciones para la saturación se ilustran gráficamente en la Fig.2.1. Note que, si el punto P, con coordenadas (T_{min} , I_{min}), está situado encima de la envolvente de las intensidades máximas ninguna lluvia será capaz de saturar el suelo a la profundidad z_w .

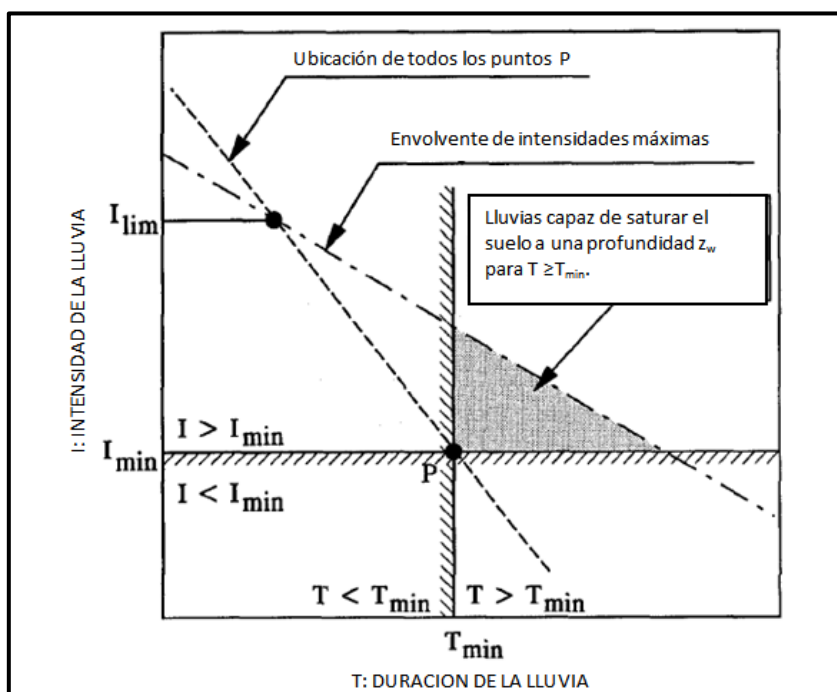


Fig.2.1: Intensidad de lluvia capaz de crear la condición de saturación a una profundidad z_w .

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

El punto donde la condición de I_{min} y la envolvente de máximas intensidades se reúnen (Fig.2.1) define un umbral de intensidad, I_{lim} , y por consiguiente un umbral de permeabilidad k_{lim} . Donde k_{lim} , representa la máxima permeabilidad que permitirá la saturación a la profundidad z_w .

Al igual que con la expresión de I_{min} , el umbral de permeabilidad no considera el efecto de la escorrentía y de la evapotranspiración, por lo tanto, suelos con permeabilidades muy por encima de k_{lim} no pueden saturarse debido a lluvias [Anexo 7.1.3].

A modo de ejemplo, en la Fig. 2.2, se muestra que el lugar donde la línea que define la intensidad de precipitación y la línea que da el requisito mínimo para la saturación se encuentran, define la duración mínima de la lluvia capaz de saturar el suelo en un talud a la profundidad z_w , para suelos encontrados en Los Ángeles.

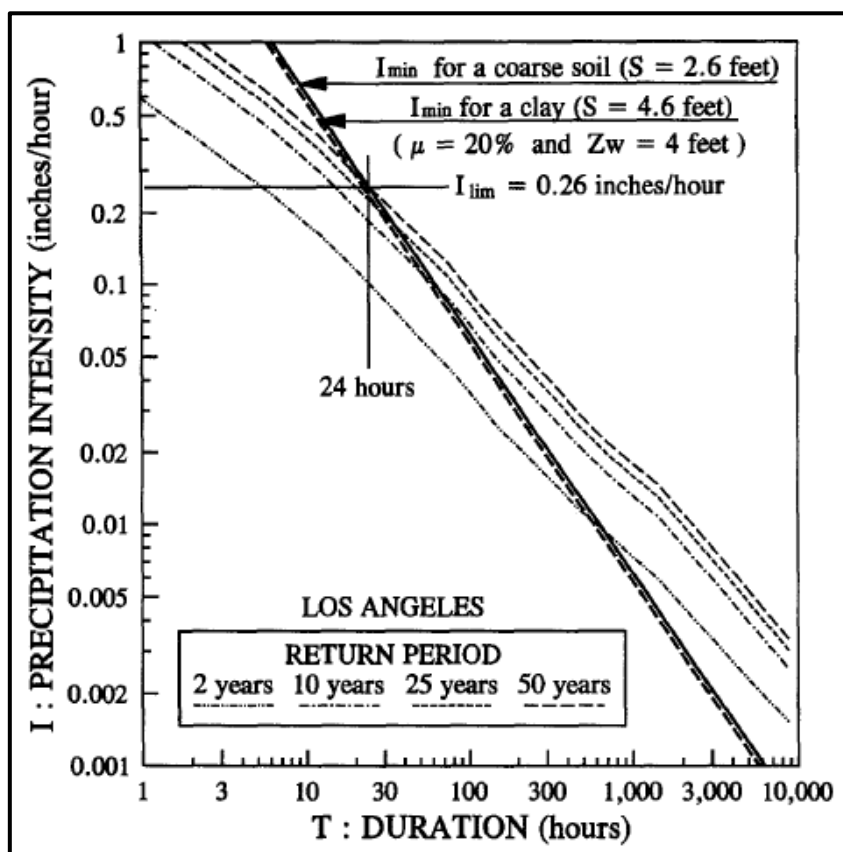


Fig.2.2: Intensidad mínima v/s Precipitación máxima para varios periodos de retorno.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

Esta figura muestra que para un suelo de grano grueso donde $\mu=20\%$ y $z_w=1.22m$, una precipitación que tiene un periodo de retorno de 50 años tendrá que durar al menos 24 horas con el fin de saturar el suelo.

Note que el rango del umbral de intensidad es pequeño y no varía mucho con el tipo de suelo. Además, en el estudio de D. Pradel y G. Raad se analizaron los datos estadísticos de las intensidades de precipitación para San Diego, Ventura y Orange [Anexo 7.1].

Es interesante observar que así como la permeabilidad k_{lim} disminuye, el periodo de retorno de la precipitación necesario para saturar disminuye. En otras palabras, cuanto menor es la permeabilidad más alta será la probabilidad de que la saturación se puede desarrollar en la pendiente. A modo de conclusión el estudio de las ecuaciones que gobiernan la infiltración en un talud homogéneo uniforme y con las características de precipitación de cuatro localidades del sur de California muestra que cuanto menor es la permeabilidad más alta será la probabilidad de que la saturación se puede desarrollar en el talud. Por lo tanto, taludes hechos de suelos arcillosos y limosos serían más propensos a desarrollar inestabilidad superficial que los taludes hechos de suelos arenosos o de grava. Esto está de acuerdo con observaciones reales. Además se debe considerar que es necesaria una acumulación gradual de humedad en el suelo durante un período de tiempo prolongado, debido a que fuertes lluvias poco después de un prolongado período de sequía no puede crear las condiciones que conducen a la saturación. Sin embargo, una lluvia intensa después de un período de lluvias moderadas puede saturar los pocos centímetros restantes superiores del suelo no saturado, y desencadenar una falla.

2.5.2.- Influencia de la humedad inducida por lluvia sobre la estabilidad de taludes en suelos erosionados, J. Kim y otros, 2004 [Anexo 7.2].

En Korea, la influencia de la lluvia en la estabilidad de taludes de suelos erosionados normalmente se establece utilizando las ecuaciones teóricas propuestas por Pradel y Raad. Este estudio fue desarrollado por J. Kim y otros (2004) con el objetivo de evaluar las potenciales deficiencias de estas ecuaciones teóricas en la predicción de la estabilidad de taludes situados en suelos erosionados. El estudio se enfocó en evaluar la importancia de dos propiedades fundamentales en los problemas de infiltración como son la profundidad del frente húmedo y la succión. Así también, se modeló la infiltración por medio de software para comparar los resultados con los obtenidos del análisis teórico. Dos diferentes suelos erosionados se muestrearon cerca del campus de la Universidad de Yonsei en Seoul, Korea. De acuerdo con la USCS, ellos pueden ser clasificados como SW y SM. El valor de la succión en el frente húmedo para estos suelos se obtuvo en laboratorio usando un tensiómetro de chorro lleno. Se realizaron varias pruebas en los suelos de estudio con diferente densidad seca y contenido de humedad.

Los resultados de estos test se muestran en el Anexo 7.2, al igual que los parámetros de los suelos SW y SM utilizados en el análisis de elementos finitos y en el cálculo teórico de la profundidad del frente húmedo.

La duración total de la lluvia aplicada fue de 100 horas y se dividió en 11 periodos de tiempo (0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 24, 48, 72 y 96 horas) y la profundidad del frente húmedo fue obtenida para cada uno de estos periodos.

Por simplicidad, la intensidad de la lluvia se mantuvo constante durante toda la duración de la lluvia. Las relaciones entre las duraciones de lluvia y la profundidad del frente húmedo obtenido por un análisis numérico y teórico, para los suelos arenosos y limosos con diferentes succiones se muestran en las Fig.6.27 y Fig.6.28 [anexo]. Se puede deducir que los valores Z_w siempre crecen con el aumento de duración de la lluvia y una buena concordancia entre los valores teóricos y numéricos se dan en $\Psi = 80$ cm.

La discrepancia general observada entre los valores de z_w obtenidos puede ser atribuida al factor de que el valor de Z_w no está correlacionado con la tensión de corte del suelo en la ecuación teórica. Por el contrario, si lo están en el análisis de infiltración transitoria.

A fin de evaluar la influencia de la profundidad de la banda de humectación y la magnitud de la succión en el frente húmedo en la estabilidad de taludes en los suelos estudiados, muchos análisis fueron desarrollados usando el equilibrio límite como se aplica en SLOPE/W, los resultados se muestran en el anexo 7.2. El estudio demuestra que la profundidad del frente húmedo juega un papel preponderante en la estabilidad de los suelos meteorizados y que las expresiones de Pradel y Raad (1993) deben usarse con precaución en los suelos meteorizados de Corea, debido a que el Factor de Seguridad de un talud infinito compuesto de estos suelos se reduce drásticamente cuando la profundidad del frente húmedo es mayor a 120 cm.

2.5.3.- Un método simple para analizar la infiltración en los taludes de suelos no saturados.

K. Gavin y J. Xue, 2007 [Anexo 7.3].

Lo que la experiencia nos ha dejado claro es que las fallas en los taludes ocurren durante o poco tiempo después del evento de lluvia. K. Gavin y J. Xue establecieron un método simple para estimar el tiempo necesario para que el frente húmedo dentro del talud se pueda desarrollar. El método que es una modificación del modelo de Green-Ampt, supone que el suelo por encima del frente húmedo permanece parcialmente saturado. Debido a la importancia de la succión en el mantenimiento de la estabilidad de taludes, la variación de las tensiones del suelo no saturado como consecuencias de cambios en el contenido de agua es el tema principal de investigación.

Como se ha mencionado anteriormente, durante la lluvia, el agua se infiltra en la superficie del suelo y se distribuye en la zona no saturada. La capacidad de infiltración del suelo, que es una medida de la velocidad máxima a la cual el agua puede entrar en el suelo, varía a lo largo de un evento de lluvia. La complejidad de la respuesta de infiltración en taludes naturales es ilustrada por mediciones de campo realizadas por Rahardjo. Estas muestran que durante las etapas iniciales de eventos de lluvia de baja intensidad o cuando la capacidad de infiltración es alta, toda el agua se infiltra en el talud. A medida que se acercaba a la capacidad de almacenamiento del suelo, comenzaba la escorrentía. El tiempo para que la escorrentía comience se ve afectada por la lluvia antecedente o por el contenido de agua inicial (succión).

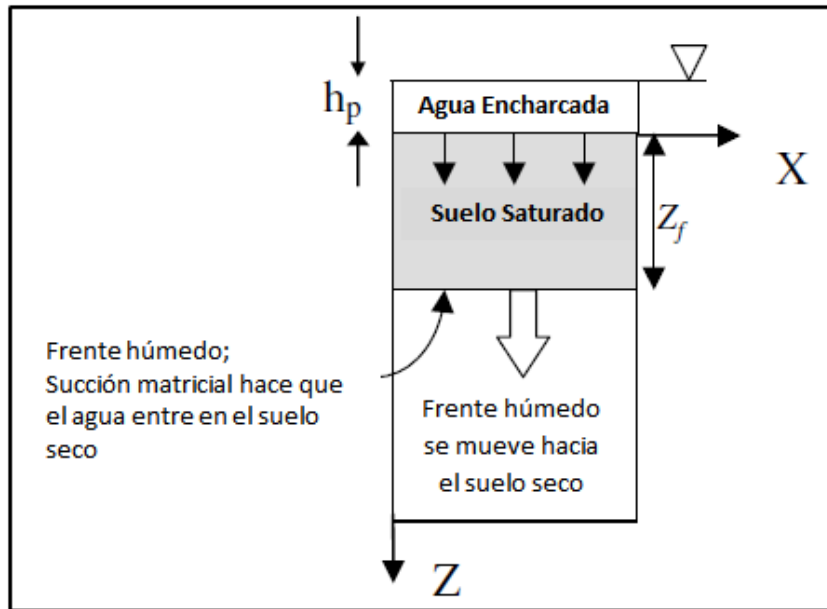


Fig.2.3: Desarrollo del frente húmedo en el modelo Green-Ampt.
(Fuente: K. Gavin y J. Xue, 2007)

Es por esto que K. Gavin y J. Xue proponen un método simple que permita la evaluación de la infiltración dentro de taludes de suelos no saturados usando las propiedades básicas de los suelos. Si el suelo está parcialmente saturado, la fase de agua no es continua (Fig. 2.3) y la carga hidráulica en esta zona es controlada exclusivamente por la succión matricial. Haciendo el supuesto de un talud parcialmente saturado:

- El suelo infiltra agua continuamente pero no se satura dentro de la zona húmeda. El supuesto se restringe generalmente a taludes de suelo, en los que no se puede producir encharcamiento y por lo tanto el suministro de agua al suelo limitado.
- Después de la lluvia el perfil final de succión en la zona húmeda se distribuye linealmente dentro del frente de húmedo.
- Si el suelo está parcialmente saturado la permeabilidad dependerá del grado de saturación. La variación de la permeabilidad con el cambio en la succión se puede medir usando la curva característica de agua en el suelo (SWCC). Mientras que la forma exacta de la SWCC dependerá del tipo de suelo y si el suelo está experimentando humectación o secado. Zhan y Ng describen la forma general de la SWCC mostrada en la Fig.6.30 [Anexo] que muestra el contenido de agua variando de la condición totalmente saturada con succión cero, a un contenido de agua residual con alta succión.

Si bien es muy recomendable que la permeabilidad del suelo en el rango apropiado de valores de succión se mida utilizando la SWCC, en ausencia de información específica la recomendación de Bouwer que $K=0.5K_s$ se adopta en esta investigación.

Este nuevo modelo especifica dos zonas dentro del frente húmedo, en la primera zona la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia, por lo que esta última controla la tasa de infiltración del suelo y la segunda zona, donde la intensidad de lluvia excede la capacidad de infiltración y la tasa de infiltración se controla por la permeabilidad del suelo Fig. 2.4.

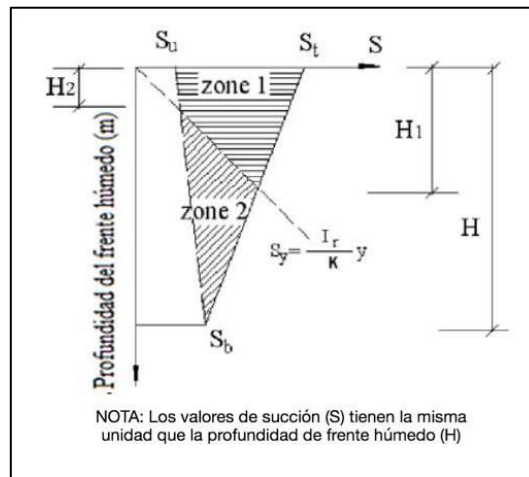


Fig.2.4: Zonas identificadas en el perfil de succión dentro del frente húmedo.

(Fuente: K. Gavin y J. Xue, 2007)

Aplicando la nueva metodología a un caso de estudio, en el cual se trabajó con un talud que formaba parte de un proyecto de carretera para un evento de lluvia de 50 horas de duración con intensidad constante (1.4×10^{-6} m/s), las mediciones mostraron que el escurrimiento ocurrió durante la precipitación y que los valores de succión y de contenido volumétrico de agua medidos a una profundidad de 2 m, empezaron a cambiar después de aproximadamente 26 h de lluvia.

Este modelo proporciona estimaciones más realistas del tiempo de infiltración que el enfoque tradicional de Green-Ampt, cuando el suelo en el frente de humectación no alcanza la saturación completa antes de la iniciación de la falla del talud.

CAPITULO III: METODOLOGIA.

A continuación, se detallan los pasos a seguir con el fin de lograr los objetivos propuestos. Ya en los capítulos anteriores se describieron tanto los métodos en estudio como las variables de las que depende cada método. En base a los análisis desarrollados, donde, se estudiaron los factores que afectan la estabilidad de los taludes, nace como primer requerimiento conocer el estado de los taludes en la provincia de Concepción así como también es necesario caracterizar las precipitaciones que predominan en la provincia debido a que son los agentes externos considerados como desencadenantes de la inestabilidad en los taludes. Con respecto a los taludes de la provincia, la información utilizada fue recopilada de la memoria realizada por C. Mardones, (2007), la cual desarrollo un catastro de los taludes viales presentes en la provincia de Concepción. Por otro lado, la caracterización de las precipitaciones se hace a través de las curvas IDF, estas fueron proporcionadas por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) a través de la entrega del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de los sectores que conforman la provincia. Del estudio de los métodos también se analizaron las variables que rigen el movimiento de agua lluvia dentro de los taludes entre las variables que cabe destacar se encuentra la permeabilidad y succión del suelo y la intensidad y duración de la lluvia. Por ultimo para desarrollar el estudio, se deberá calcular el umbral de intensidad siguiendo el procedimiento establecido por D. Pradel y G. Raad (1991) descrito en el capítulo anterior, de los cuales se podrá obtener un valor de precipitación, el cual asegura la condición de saturación total del suelo dentro del talud, se convendrá que el suelo totalmente saturado producirá la condición de inestabilidad en el talud ocasionando el deslizamiento, de esta manera el valor de precipitación calculado se definirá como el umbral critico de precipitación para la provincia de Concepción. Es importante aclarar que solo se utilizará este método para el cálculo de umbral de precipitación, esto debido a que estudios posteriores al desarrollado por D. Pradel y G. Raad en 1991 solo modifican el modelo original aplicándolo en las respectivas regiones de estudio, como queda demostrado con la investigación de J. Kim y otros (2004) donde comprueban la validez de las ecuaciones propuestas al conseguir una gran similitud en los resultados entre el análisis teórico (ecuaciones) y el análisis numérico (análisis de elementos finitos). Haciendo el alcance de que, si bien, estas modificaciones al modelo original han demostrado avances en la teoría de aplicación del método, como es el caso de la investigación de K. Gavin y J. Xue (2007), todos los autores coinciden al momento de evaluar las variables que gobiernan el problema de infiltración de aguas en taludes,

por lo que se escoge entonces la metodología propuesta por D. Pradel y G. Raad, pues resulta la más factible y simple de aplicar. Con el fin de aportar al estudio, se incorporaran en el análisis los resultados obtenidos por la exalumna M. Pradenas, (2013) en su estudio “Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción” en el cual se aplicaron métodos empíricos para la determinación de los umbrales.

3.1.- Descripción de la Provincia de Concepción.

La provincia de Concepción está conformada por las comunas de Talcahuano, Penco, Tomé, Florida, Hualqui, Santa Juana, Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Chiguayante, Hualpén y Concepción, su capital provincial. Esta provincia alberga cerca del 50% de la población de la región del Bío-Bío (censo chileno de 2012), la mayor población de las cuatro provincias que conforman la región del Bío-Bío, a pesar de tener la superficie más pequeña de la región con 3470 Km² y se caracteriza por tener una extensa zona costera. En la zona de Concepción, se distinguen cuatro unidades geológicas principales, descritas por Galli en 1967, entre las cuales se encuentran: Rocas Metamórficas, Rocas Intrusivas, Rocas Sedimentarias y los Depósitos Superficiales. La provincia de concepción se encuentra situada sobre un extenso batolito costero de meteorización relativamente avanzada, como resultado de esta meteorización los suelos residuales más comunes que se pueden encontrar en la provincia son el Maicillo Granítico, material correspondiente a una Arena gruesa, el cual proviene de rocas intrusivas y las Arcillas provenientes de rocas metamórficas y sedimentarias.

La potencialidad que presentan estos suelos a ser afectados por agentes externos, se debe a las actividades antrópicas que se realizan sobre los cerros y laderas, como son las excavaciones, rellenos, cambios en el uso de suelo entre otras. Actividades que contribuyen por un lado, a la desestabilización de los taludes producto de una disminución de la resistencia del material y además al movimiento o transporte de partículas incrementando el riesgo de que se produzca la meteorización, fenómeno que tiene consecuencias desastrosas, si logra un nivel muy alto de degradación del suelo.

La Provincia de Concepción posee un clima templado marítimo con una influencia mediterránea, donde las precipitaciones alcanzan los 1.100 mm anuales, del total anual un 65% a 70% se generan entre los meses de mayo a agosto. La precipitación es el volumen de agua lluvia que cae sobre una determinada área dentro de un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa sobre los procesos hidrológicos en el suelo, modificando así el contenido de agua subterránea, lo que a su vez afecta a la estabilidad de los taludes o laderas. Cada región posee un régimen de lluvias que se repite de forma similar cada año, pero, es importante señalar que dentro de una misma región el sistema de lluvias puede ser diferente de un sector específico a otro. Un análisis a nivel nacional destacó que en la zona central de Chile, durante los meses de mayo, junio, julio y agosto se presentan por lo menos tres veces más deslizamientos que aquellos meses que son considerados más secos, esto se debe a que la provincia de Concepción posee un clima de tendencia mediterránea, en el cual las lluvias se concentran fuertemente en el periodo de invierno. Considerando que este patrón de lluvias es común en otras regiones del país, con los mismos efectos devastadores, es posible confirmar que las lluvias son el principal desencadenante de la mayor parte de los movimientos en masa.

3.2.- Área de estudio.

El área de estudio comprende a los taludes pertenecientes a zonas viales de la provincia de Concepción catastrados por la exalumna C. Mardones, (2007) donde las rutas seleccionadas incluyen tanto a rutas urbanas como interurbanas, las rutas catastradas fueron: Ruta de la madera (CH-156), Ruta del Itata (CH-152), Ruta 150, Pedro de Valdivia-Chiguayante, Concepción-Talcahuano y la ruta de Concepción a San Pedro de la Paz. En la Fig.3.5 se muestran las rutas consideradas en este estudio. En el catastro se describe la situación actual de los taludes los cuales se ven afectados principalmente por erosión. De las características estudiadas, las más importantes a tener en consideración son aquellas que, en primer lugar, describen al talud como son su altura, ancho y pendiente entre otras y segundo las que dan cuenta del tipo de suelo a través de una descripción visual y por medio de la clasificación USCS. Tomando esta información como antecedente base para este estudio fue posible caracterizar los suelos encontrados en la provincia de Concepción, los cuales según las estratigrafías que se observaron los suelos corresponden a materiales compuestos de Arcillas de baja plasticidad (CL) y Arenas-limosas (SM).

3.3.- Precipitación.

Debido a la gran magnitud del área de estudio y con el fin de caracterizar el régimen de precipitación de la provincia se procedió a recopilar las curvas IDF de las ciudades comprometidas en las rutas viales antes mencionadas. Para lo cual fue necesario solicitar a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) el Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de los siguientes sectores: Concepción, San Pedro, Talcahuano, Chiguayante, Coronel-Lota y Penco-Tome. Cada sector trabaja con las estaciones pluviométricas más cercanas a partir del cual determinan las curvas IDF para una duración total de 24 horas, cabe destacar que en algunos sectores las estaciones pluviométricas se repiten dada la escasa cantidad en funcionamiento que existe de estas. Es así que a cada ruta en estudio se le asignara el o las estaciones que estén más próximas de manera de lograr la mayor exactitud en los resultados. Es importante mencionar que la determinación de las curvas IDF no se realizó en este estudio, solo se trabajó con las curvas entregadas por la DOH para cada una de las estaciones pluviométricas que se muestran en la Fig.3.5. En la tabla 1 se resumen las rutas en estudio con las respectivas estaciones pluviométricas asignadas a cada ruta.

Tabla 1: Rutas y estaciones pluviométricas consideradas en el estudio. (Fuente: Elaboración Propia)

Rutas en Estudio	Estaciones Pluviométricas
Ruta de la Madera CH-156	Cerro Caracol, Chiguayante, Hualqui
Ruta del Itata CH-152	Carriel Sur, Bellavista
Ruta 150	Carriel Sur, Dichato, Coelemu
P. de Valdivia-Chiguayante	Cerro Caracol, Nonguen, Chiguayante
Concepción-Talcahuano	Talcahuano, Pto. Hualpén, Pta. Tumbes
Concepción-San Pedro de la Paz	Carriel Sur, Cerro Caracol

3.4.- Parámetros del suelo.

Los suelos encontrados en el catastro vial corresponden a dos tipos de material, una Arcilla de baja plasticidad (CL) y una Arena-Limosa (SM). Las propiedades físicas de los suelos utilizados en el método se muestran en la tabla 2. Se recurrió a literatura para obtener valores referenciales de los parámetros de los suelos necesarios para la aplicación del método. Estos valores fueron tomados del libro “Mecánica de suelos en la ingeniería práctica” de Karl Terzaghi. Un caso especial se da con la succión, este parámetro que depende, además del tamaño de las partículas de suelo, del contenido de agua del suelo, el cual es recomendable medirlo en terreno o en laboratorio, de esta forma la succión se puede medir utilizando la curva característica de agua en el suelo (SWCC), que es la curva que define la relación entre la succión y el contenido volumétrico de agua, pero dada la complejidad de los ensayos para obtener esta curva, se opta por trabajar con el rango propuesto por D. Pradel y G. Raad quienes establecen que la succión va de 7.8KPa para suelos de grano grueso a 13.8 para arcillas.

Tabla 2: Parámetros de suelo. (Fuente: K. Terzaghi, 1973)

Tipo de suelo	Porosidad μ (%)	Permeabilidad k (cm/s)	Ang. Fricción ϕ ($^{\circ}$)	Succión S (kPa)	Peso específico γ (kg/m ³)
Arena-Limosa	23 – 48	$10^{-3} - 10^{-2}$	25 – 40	7.8	1400 – 1650
Arcilla	49 – 59	$10^{-10} - 10^{-6}$	10 – 25	13.8	1600 – 1800

Para el caso de la profundidad del frente húmedo (Z_w) se tomaran como antecedentes los resultados obtenidos por el exalumno L. Rivas, (2011) quien determinó la profundidad del frente húmedo mediante ensayos de análisis de humedad gravimétrica el cual arrojó profundidades del orden de 50cm y 70 cm. Dado que Z_w es un parámetro de entrada directo en el cálculo del umbral de precipitación, cualquier cambio en la magnitud del frente húmedo produciría un umbral de precipitación diferente, razón por la cual se opta por trabajar con un valor único de Z_w igual a 0.5m para determinar el umbral de precipitación de la provincia de Concepción.

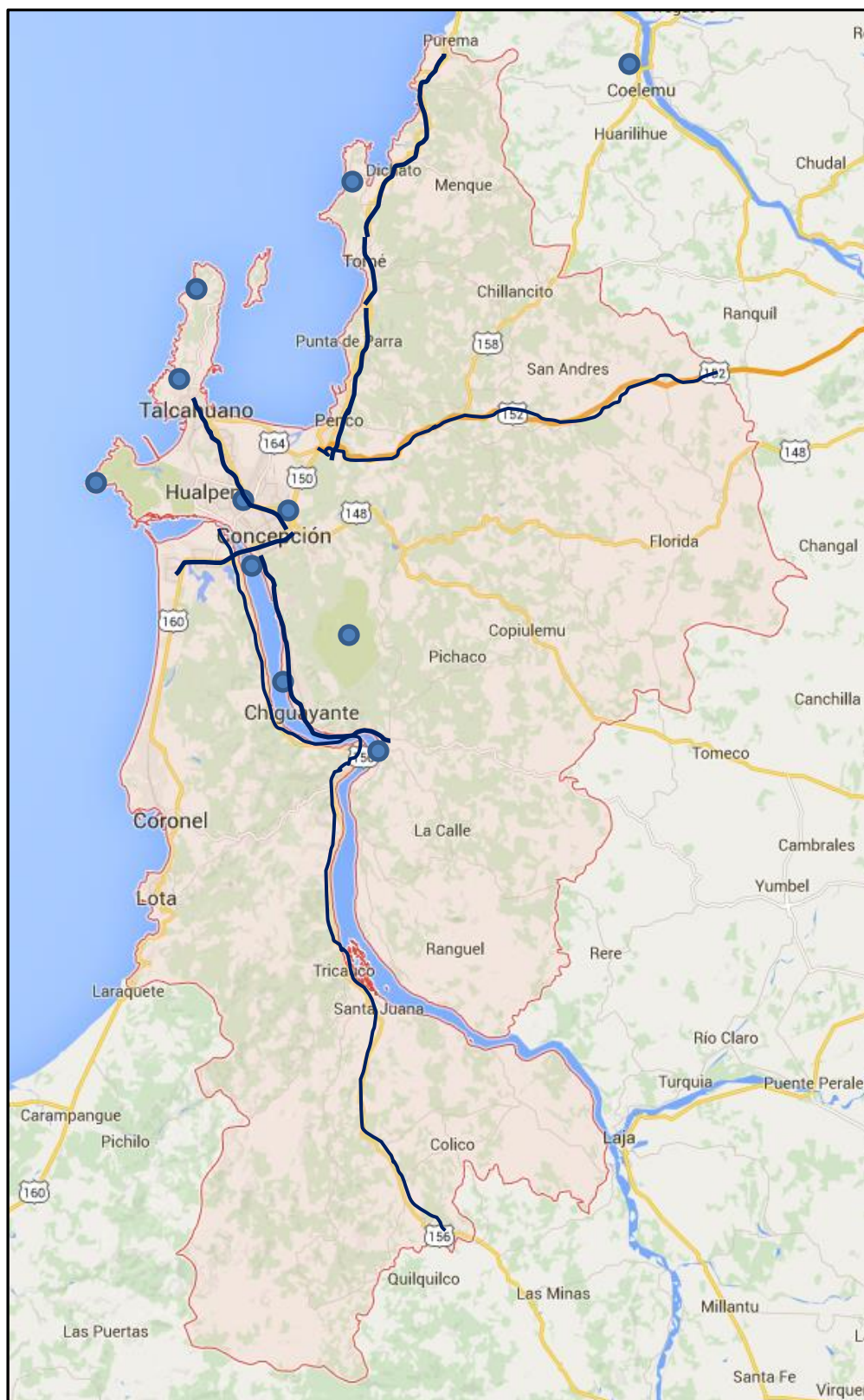
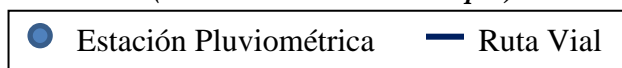


Fig.3.5: Estaciones pluviométricas y rutas seleccionada, provincia de Concepción.

(Fuente: Elaboración Propia)



CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANALISIS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología propuesta para todas las rutas mencionadas en el capítulo anterior, cumpliendo así con los objetivos establecidos en esta investigación.

4.1.- Desarrollo Metodología.

De las observaciones realizadas al catastro desarrollado por C. Mardones, (2007) se encontró que los taludes de la provincia de Concepción estaban constituidos por dos tipos de suelo, por esta razón, se determinó un umbral de precipitación cada uno de ellos. Al igual que la profundidad del frente húmedo, la porosidad es otro de los parámetros de entrada que afectan de manera directa el cálculo del umbral, razón por la cual, se optó por tomar el valor medio del rango de porosidad mostrado en la tabla 2, para cada tipo de suelo.

En base a un ejemplo se detallara la metodología que se utilizó para obtener el umbral de precipitación de la provincia de Concepción. Para este ejemplo, se tomaron los antecedentes de precipitación de la estación Carriel Sur.

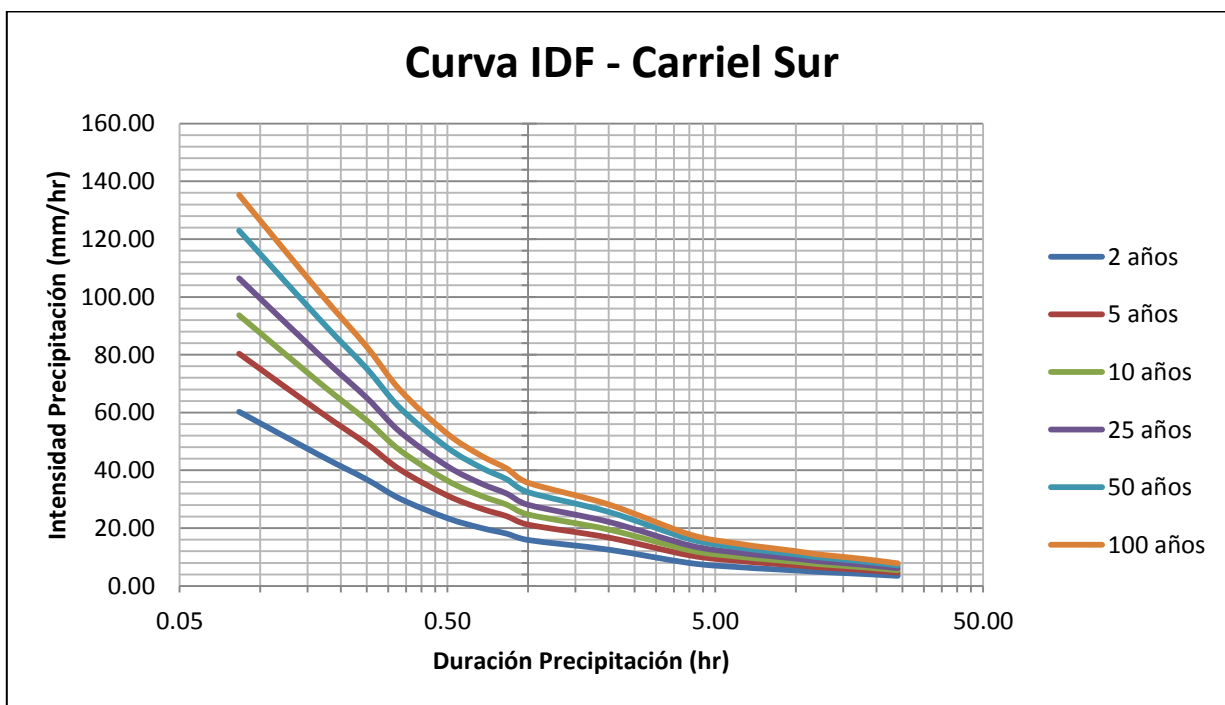


Fig.4.6: Curva IDF estación Carriel Sur. (Fuente: Elaboración Propia)

En la Fig.4.6 se muestra la curva IDF de la estación Carriel Sur, requisito mínimo para poder desarrollar el método propuesto. El siguiente requerimiento fue calcular según las ecuaciones proporcionadas por D. Pradel y G. Raad la curva de intensidades mínimas para cada tipo de suelo, la que luego se incorporó en la curva IDF de la estación pluviométrica en estudio. Fig.4.7. Las curvas IDF y la curva de intensidades máximas se muestran en el Anexo 7.5.

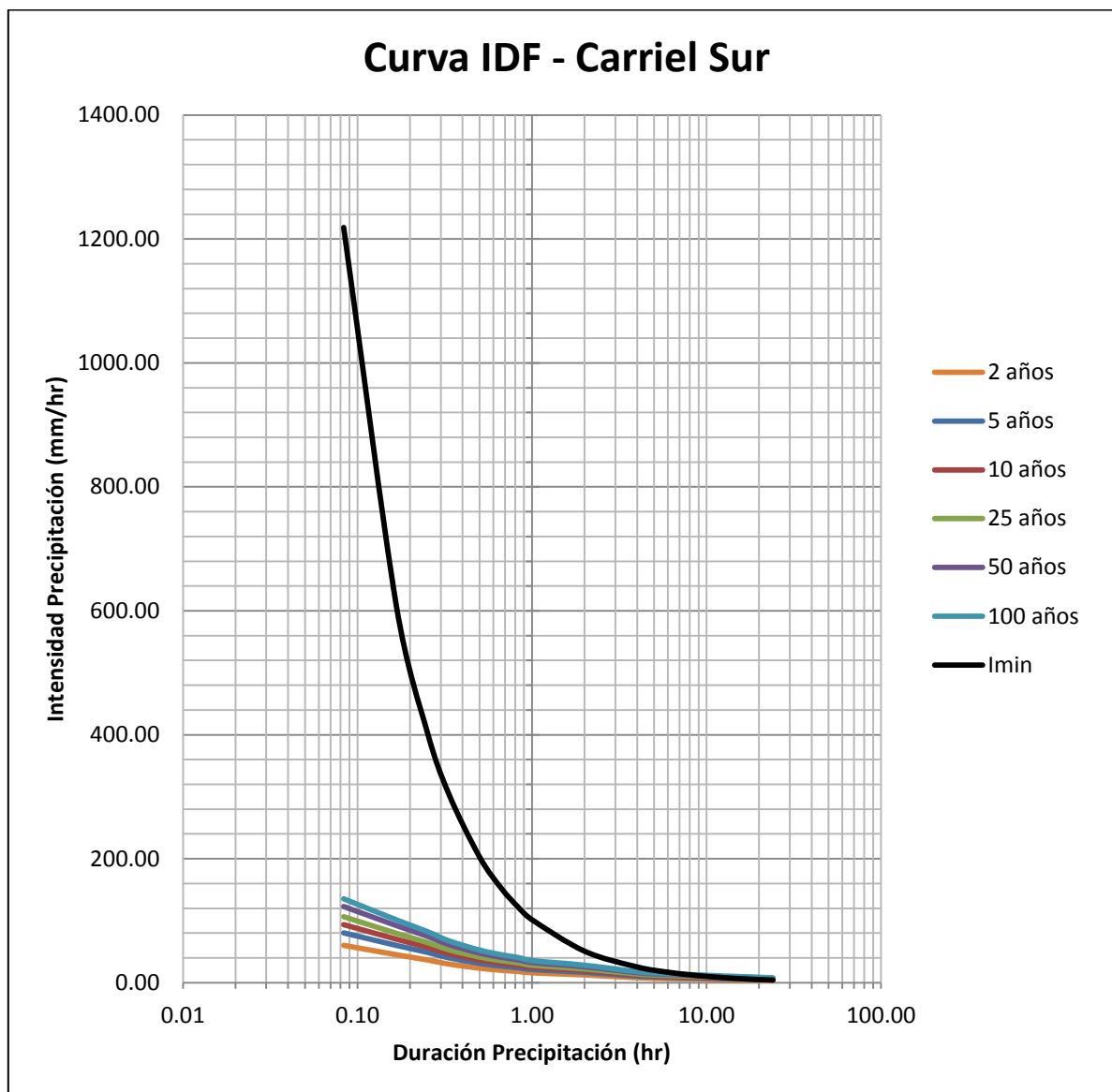


Fig.4.7: Intersección de curva IDF y curva de intensidades mínimas.
(Fuente: Elaboración Propia)

De esta forma la intersección de la curva de intensidades mínima con la curva IDF definió la intensidad límite necesaria para saturar el suelo, para el periodo de retorno correspondiente.

En la Tabla 3, se muestra de manera más clara los resultados obtenidos de intensidad límite para la estación pluviométrica seleccionada. Además del valor de precipitación correspondiente y la duración que debería tener esta precipitación para alcanzar la saturación.

Tabla 3: Resultados metodología para una Arena-limosa. (Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Límite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	13.94	97.58
50	8	11.95	95.60
25	10	9.46	94.60
10	13	7.37	95.81
5	17	5.68	96.56
2	23	3.66	84.18

Este procedimiento se realizó para cada estación pluviográfica comprendida en las rutas viales antes mencionada y para ambos tipos de suelo. El valor de precipitación resaltado (PP) corresponde al umbral de precipitación propuesto por D. Pradel y G. Raad, el cual asegura la saturación total del suelo produciendo inestabilidad dentro del talud. El hecho de que exista una similitud entre los valores de precipitación se debe a que la curva de intensidad mínima depende de las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, por lo tanto, este valor representa la cantidad de agua que el suelo puede absorber de manera de llenar todos los espacios vacíos y así asegurar la saturación del suelo

4.2.- Definición de umbral físico de precipitación para la provincia de Concepción.

A continuación se presentan los umbrales físicos de precipitación determinados según la metodología detallada anteriormente para cada ruta vial perteneciente a la provincia de Concepción Tabla 4. A modo de ejemplo en la Fig.4.8 y Fig.4.9 se muestran los resultados obtenidos para las estaciones pluviográficas comprendidas en la ruta vial de Concepción – San Pedro de la Paz, los resultados de las otras rutas se muestran en el anexo 7.6. El umbral de precipitación fue estimado como el promedio de precipitaciones de todas las estaciones que conforman a la ruta. Para el caso de la arena-limosa se aplicó una porosidad igual a 35% y para las arcillas de baja plasticidad se utilizó una porosidad de 54%.

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - Zw=0.5 - SM			
P.R.	Duración	Intensidad	PP
(años)	(hr)	(mm/hr)	(mm)
100	7	13.94	97.58
50	8	11.95	95.60
25	10	9.46	94.60
10	13	7.37	95.81
5	17	5.68	96.56
2	23	3.66	84.18

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - Zw=0.5 - CL			
P.R.	Duración	Intensidad	PP
(años)	(hr)	(mm/hr)	(mm)
100	13	10.65	138.45
50	15	9.15	137.25
25	18	7.31	131.58
10	21	5.93	124.53
5	23	4.80	110.40
2			

Fig.4.8: Intensidades mínimas Estación Carriel Sur para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - Zw=0.5 - SM			
P.R.	Duración	Intensidad	PP
(años)	(hr)	(mm/hr)	(mm)
100	8	12.31	98.48
50	9	10.71	96.39
25	12	8.07	96.84
10	15	6.50	97.50
5	19	5.04	95.76
2	23	3.37	77.51

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - Zw=0.5 - CL			
P.R.	Duración	Intensidad	PP
(años)	(hr)	(mm/hr)	(mm)
100	15	9.43	141.45
50	17	8.12	138.04
25	21	6.31	132.51
10	23	5.24	120.52
5			
2			

Fig.4.9: Intensidades mínimas Estación Cerro caracol para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

- Umbral de precipitación Arena – Limosa (SM): 96.51 mm
- Umbral de precipitación Arcilla de baja plasticidad (CL): 134.83 mm

Tabla 4: Umbral de precipitación para la provincia de Concepción.

Rutas en Estudio	Umbral de Precipitación (mm)	
	Arena-Limosa (SM)	Arcilla baja plasticidad (CL)
Ruta de la Madera CH-156	101,96	141,49
Ruta del Itata CH-152	100,46	139,85
P. de Valdivia-Chiguayante	100,56	140,84
Ruta 150	94,81	125,4
Concepción-Talcahuano	97,28	135,85
Concepción-San Pedro de la Paz	96,51	134, 83
PROVINCIA CONCEPCION	99	136

Por lo tanto, una propuesta de umbral de precipitación para la provincia de Concepción con los valores de porosidad y frente húmedo definidos será de 98.6 mm para el caso de taludes hechos de Arena-Limosa y de 136.4 mm para taludes de Arcilla. Esto, según lo establecido por D. Pradel y G. Raad, asegura la saturación total del suelo dentro del talud provocando la inestabilidad y posteriormente la falla, donde, la duración de la precipitación dependerá del periodo de retorno del evento de lluvia, el hecho de que la duración de la precipitación no supere las 24 horas, es debido a que las curvas IDF entregadas por la Dirección de Obras Hidráulicas tenían como límite esta duración.

Es importante mencionar que el último valor de precipitación de cada estación, no se incorporó en el cálculo del umbral de precipitación debido a que se consideró como un valor atípico, dado que no seguía la línea de las demás precipitaciones, esto significa que para ese periodo de retorno alcanzar la saturación requerirá de más tiempo que el mostrado en las figuras o que la intensidad de lluvia es muy baja y no alcanza el valor del umbral de precipitación independiente de la duración.

En la estación correspondiente a Pto. Hualpén, no se registraron intensidades límites para el suelo de tipo Arcilla, debido a que según lo mostrado por las curvas IDF, ese sector presenta los valores más bajos de precipitación. Por lo tanto, ninguna lluvia es capaz de saturar el suelo. Extendiendo este punto, en los casos de estaciones donde no se presentan valores de precipitación, se debe al mismo motivo.

Tanto para la Arena-Limosa como para la Arcilla de baja plasticidad, se observa un patrón referente a la distribución espacial de los umbrales de precipitación, esto es, las rutas que se

encuentran bordeando la costa como son la Ruta-150, el camino que une Concepción con Talcahuano y el camino que une Concepción con San Pedro de la Paz, presentan umbrales de precipitación menores que las rutas ubicadas al interior de la provincia (Ruta del Itata, Ruta de la Madera y Pedro de Valdivia-Chiguayante). Lo que indica que los suelos cercanos a la costa, presentan un contenido de humedad inicial mayor, por lo que necesitan de menos precipitación para lograr la saturación.

4.3.- Influencia de la porosidad y del frente húmedo en el cálculo del umbral de precipitación.

En esta etapa se evaluó la relevancia de la porosidad y del frente húmedo en la determinación del umbral de precipitación. Para lo cual, a modo de demostración se aplicó la misma metodología a los registros pluviométricos de la estación Carriel Sur, considerando como material de talud una Arena-Limosa.

4.3.1.- Porosidad.

Intensidad Limite para $\mu=23\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	3	23.02	69.06
50	4	16.22	64.88
25	5.5	12.20	67.10
10	7	9.65	67.55
5	9	7.48	67.32
2	14	4.60	64.40

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	13.94	97.58
50	8	11.95	95.60
25	10	9.46	94.60
10	13	7.37	95.81
5	17	5.68	96.56
2	23	3.66	84.18

Intensidad Limite para $\mu=47\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	10	12.03	120.30
50	12	9.96	119.52
25	15	7.93	118.95
10	20	5.23	104.60
5	24	3.49	83.76
2			

Fig.4.10: Intensidades mínimas para distintos valores de porosidad.

Para una Arena-Limosa la porosidad varía entre 23% - 47%, en esta demostración se determinó el umbral de precipitación para los dos valores extremos y el valor medio de la porosidad, manteniendo constante la profundidad del frente húmedo Z_w . Como se ve en la figura 4.10 la precipitación necesaria para saturar el suelo aumenta a medida que incrementa el valor de porosidad. Esto debido a que aumenta el volumen de vacíos dentro de la masa de suelo, por lo que requiere de más agua para rellenar los poros.

4.3.2.- Frente Húmedo.

P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	1.3	33.45	43.49
50	1.5	29.03	43.55
25	1.8	23.35	42.03
10	2	19.51	39.02
5	2.8	14.28	39.98
2	6	6.56	39.36

P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	3	23.02	69.06
50	4	16.22	64.88
25	5.5	12.20	67.10
10	7	9.65	67.55
5	9	7.48	67.32
2	14	4.60	64.40

P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	13.94	97.58
50	8	11.95	95.60
25	10	9.46	94.60
10	12	7.59	91.08
5	16	5.83	93.28
2	22	3.92	86.24

Fig.4.11: Intensidad mínimas para distintos valores de frente húmedo.

En este ejemplo, la profundidad del frente húmedo tomo los siguientes valores: 0.3; 0.5 y 0.7 cm. El cálculo de umbral se llevó a cabo para un valor constante de porosidad igual a 23%. Como se observa en la figura 4.11, al igual que en el caso anterior, a medida que aumenta la profundidad del frente húmedo incrementa la precipitación necesaria para saturar el suelo. Lo cual tiene sentido ya que para poder saturar el suela a una profundidad mayor, se necesitará de una lluvia más larga para alcanzar el umbral de precipitación.

4.4.- Umbral empírico de precipitación.

Los umbrales empíricos se establecen identificando las áreas donde ha ocurrido o no un deslizamiento correlacionándolo a un evento de precipitación. Para los umbrales empíricos resulta necesario disponer de una base de datos de calidad, tanto del inventario de movimientos en masa, como del historial de lluvias. Los parámetros de precipitación que considera el umbral empírico son la lluvia acumulada (LA) y la lluvia acumulada antecedente (LAA). La LA representa la lluvia caída en los días inmediatamente previos al deslizamiento, incluyendo el día del evento, mientras que la LAA corresponde a la cantidad de lluvia caída los días precedentes a los considerados en la lluvia acumulada. Teniendo en consideración lo anterior, la exalumna M. Pradenas, (2013) desarrollo una investigación la cual llevaba por nombre “Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción” donde logro establecer umbral de precipitación utilizando métodos empíricos para la provincia de Concepción. Los resultados que obtuvo se muestran en la Fig. 4.12.

La metodología utilizada en el desarrollo de este proyecto consideraba la combinación entre la lluvia acumulada y la lluvia acumulada antecedente. La combinación recomendada por M. Pradenas, (2013) considera 5 días de lluvia acumulada con 30,60 y 90 días de lluvia acumulada antecedente. Combinación con la cual logro establecer el umbral de precipitación.

El hecho de que ambos métodos se basan en enfoques distintos, por un lado los métodos empíricos estudian el problema de la predicción de deslizamientos de manera externa, los métodos físicos lo analizan de forma más local, dificulta la comparación entre ambos métodos.

Sin embargo, en base a los resultados conseguidos es posible llegar a valores similares de precipitación, por ejemplo, para el caso del umbral empírico con una lluvia acumulada de 1 día el umbral de precipitación es de 36mm, valor cercano al umbral físico calculado con una porosidad de 23% y un frente húmedo de 0.3cm. Lo cual, podría complementar la información obtenida por separado de cada uno de los métodos.

Gráfico		Umbral mínimo	Umbral máximo	
LA (días)	LAA(días)	LAA (mm)	LA (mm)	LAA (mm)
1	5	–	36	77
	10	–	36	124
	15	–	36	170
	30	35	36	265
	60	90	36	600
	90	120	36	680
3	5	–	95	86
	10	–	95	120
	15	–	95	190
	30	50	95	340
	60	90	95	600
	90	120	95	698
5	5	–	100	90
	10	–	100	155
	15	–	100	198
	30	50	100	348
	60	96	100	600
	90	130	100	710
7	5	–	130	90
	10	–	130	160
	15	–	130	200
	30	50	130	380
	60	100	130	680
	90	130	130	760

Fig.4.12: Resumen lluvia acumulada y lluvia acumulada antecedente para umbrales críticos.

(Fuente: M. Pradenas, 2013)

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo a los antecedentes analizados y con los resultados obtenidos luego de la aplicación de la metodología propuesta por D. Pradel y G. Raad, para la caracterización de suelos y régimen de precipitaciones presentes en la provincia de Concepción, y considerando los objetivos propuestos en el marco de investigación de este informe, se puede concluir lo siguiente:

6.1.- Conclusiones

- ❖ De los métodos estudiados, se observa una gran concordancia entre los autores con respecto a las variables que rigen el problema, ya sean propias del suelo como de la precipitación. Siendo las variables más importantes consideraras en los estudios de infiltración la intensidad y duración de la lluvia, el tipo de suelo, la succión y la permeabilidad.
- ❖ Las condiciones que generarán la inestabilidad de los taludes serán la propagación del frente húmedo y la saturación total del suelo en esta zona. Se evidencia que a medida que aumentan los valores de porosidad y frente húmedo, la precipitación necesaria para lograr la condición de saturación aumenta también, lo cual tiene sentido ya que a mayor profundidad y porosidad serán más los espacios vacíos dentro de la masa de suelo que se deberán llenar con agua lluvia.
- ❖ El umbral de precipitación para la provincia de Concepción para una profundidad de frente húmedo igual 0.5m y una porosidad de 35% para Arenas-Limosas y 54% para Arcillas de baja plasticidad será de 98.6mm y 136.4mm respectivamente.
- ❖ El umbral físico de precipitación calculado en este estudio, no varía con respecto al periodo de retorno, esto se debe a que la curva de intensidad mínima se forma a partir de los parámetros del suelo, y lo que representa el umbral es la precipitación necesaria para lograr la saturación dentro del frente húmedo.

- ❖ Si bien es posible generar un umbral de precipitación a través de métodos físicos, dado que los parámetros de entrada son las propiedades mecánicas de los suelos, y estos pueden variar dentro de un mismo sector, no es posible generalizar un umbral para un sector en específico.

6.1.- Recomendaciones

Con todo lo desarrollado en esta investigación, se plantean algunas recomendaciones con el objetivo de estudiar los temas que en esta investigación no se consideraron.

- ❖ Una caracterización completa de los suelos presentes en la provincia de concepción, esto incluye los ensayos de propiedades mecánicas e hidráulicas y mediciones en terreno del contenido de agua para el cálculo de succión y profundidades de frente húmedo. En cuanto a los datos de precipitación, sería conveniente contar con curvas IDF de mayor duración. Para analizar los efectos posteriores a eventos de lluvia de 24 horas.
- ❖ Realizar un estudio considerando elementos finitos, es decir, modelar el problema en software de manera de poder comprobar los resultados obtenidos con los análisis teóricos. De esta forma estudiar el caso particular de la saturación dentro del talud. Debido a que nuevos estudios establecen que la falla del talud se puede producir antes de lograr la saturación del suelo.
- ❖ Considerar los análisis de estabilidad global de taludes, de manera de observar la importancia del avance del frente húmedo dentro del talud y como este se relaciona con la profundidad del plano de falla dentro del talud.
- ❖ Estudiar la importancia del ángulo de inclinación del talud, y cómo influye en el proceso de infiltración de agua lluvia. Abarcando temas relacionados con la escorrentía y evapotranspiración como factores que afectan la permeabilidad del suelo y por ende el grado de saturación dentro de una masa de suelo.
- ❖ Si bien los métodos físicos y empíricos utilizan enfoques distintos en la determinación de umbrales de precipitación, sería interesante considerar un análisis de comparación entre ambos y determinar de qué manera se pueden complementar.

Bibliografía

- M. Valenzuela, R. Bonilla, C. Soto. Caracterización geotécnica y resistencia al corte de los suelos residuales de Concepción. V congreso chileno de ingeniería geotécnica.
- J. Orduz, Deslizamientos superficiales inducidos por lluvias, Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, Depto. Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá, Colombia.
- J. Vélez E. Aristizábal, H. Martínez. Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. Rev. Acad. Colomb. Cienc, pages 209–227, 2010.
- RAMÍREZ Araneda, Suhelen B. estudio de la relación lluvia – deslizamiento en la Estabilidad de taludes. Tesis (título de ingeniero civil). Concepción, Chile. Universidad del Bío-Bío, Depto. De Ingeniería civil, 2010. 157h.
- C. Tapia. Estados de arte de los métodos físicos para definir umbrales críticos por lluvia. Universidad del Bío – Bío. Concepción, Chile, 2015.
- M. Pradenas. Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción. Universidad del Bío – Bío. Concepción, Chile, 2013.
- F. Torres. Umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa para la ruta CH.156. Universidad del Bío – Bío. Concepción, Chile, 2013
- C. Astorga. Determinación de un umbral empírico de deslizamientos por precipitación para la autopista del Itata. Universidad del Bío – Bío. Concepción, Chile, 2011.
- C. Mardones. Catastro a taludes viales de la provincia de Concepción. Universidad del Bío – Bío. Concepción, Chile, 2007.
- J. Montoya J Vélez H. Martínez A. Guerra. E. Aristizábal, T. González. Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de aburrá. EIA, ISSN 1794-1237 Número 15, páginas 95–111, julio 2011.
- 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. Kim, S. Jeong, S. Park, J. Sharma. Engineering Geology 75, páginas 251–262. 8 Junio 2004.
- K. Gavin y J. Xue. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes. Elsevier Ltd. Computers and Geotechnics, vol 35, páginas 223–230, Abril 2007.
- L. Lee, N. Gofar, H. Rahardjo. A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability, Engineering Geology, volume 108, páginas 272–285, Julio 2009.
- W. Li, L. Lee, H. Cai, H. Li, F. Dai, M. Wang. Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope, Engineering Geology vol 153, páginas 105–113, 2013.

- G. Espinosa, E. Hajek, E. Fuentes. Distribución geográfica de los deslizamientos de tierras asociados a desastres en Chile. Laboratorio de ecología. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- E. Aristizábal, M. Gamboa, F. Leoz. Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá, Colombia. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 13, p. 155-169. Julio 2010. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín. Diciembre 2010.
- N. Torres. Geología y Geotecnia, filtraciones. Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Argentina. Octubre, 2010.
- E. Aristizábal. Inventario de emergencias y desastres en el valle de aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos, revista gestión y ambiente, vol 10, pág 17-30, 2010
- N. Gofar, L. Lee, A. Kassim. Response of Suction Distribution to Rainfall Infiltration in Soil Slope. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.
- Gofar et al. Stability of unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration. Proceedings of the fourth international conference on disaster prevention and rehabilitation, pág 158-167. Semarang, Indonesia, 10-11 Septiembre de 2007.
- X. Li, J.H. Li, L.M. Zhang. Predicting bimodal soil–water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters. Elsevier Ltd. Computers and Geotechnics 57 (2014) páginas 85–96. January 2014.

ANEXOS

Índice Anexos

7.1.- D. Pradel y G. Raad, 1991.-----	37
7.1.1.- Estabilidad Superficial.-----	37
7.1.2.- Principios de infiltración.-----	37
7.1.3.- Intensidad y duración de lluvias.-----	38
7.1.4. Análisis de taludes hechos de suelos muy permeables.-----	42
7.2. - J. Kim, S. Jeong, S. Park y J. Sharma, 2004.-----	44
7.2.1.- Calculo de succión.-----	44
7.2.2.- Resultados Análisis teóricos y numérico.-----	47
7.3.- K. Gavin y J. Xue, 2007 -----	50
7.3.1.- Curva característica de agua en el suelo (SWCC), Zhan y Ng.-----	50
7.3.2.- Modelo numérico.-----	50
7.3.3.- Caso de estudio.-----	51
7.4.- Curvas IDF de las estaciones consideradas en este estudio.-----	53
7.5.- Intersección curvas IDF – curva intensidades mínimas.-----	59
7.6.- Umbrales de precipitación por ruta vial.-----	70
7.6.1.- Ruta de la Madera CH-156-----	70
7.6.2.- Ruta del Itata CH-152 -----	71
7.6.3.- Ruta 150.-----	72
7.6.4.- Pedro de Valdivia-Chiguayante.-----	73
7.6.5.- Concepción-Talcahuano.-----	74

6.1.- D. Pradel y G. Raad, 1991.

6.1.1.- Estabilidad Superficial.

Para un talud infinito con infiltración paralela a la cara, Skempton y DeLory (1957) establecieron la siguiente formula de factor de seguridad, F:

$$F = \frac{c' + (\gamma_t - \gamma_w) z_w \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma_t z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

Donde, c' = la cohesión efectiva, ϕ' = ángulo de fricción efectiva, α = ángulo del talud,

Z_w = profundidad vertical del suelo saturado, γ_t = peso específico total del suelo y γ_w = peso específico del agua. Si se desprecia la cohesión la Eq. (1) queda:

$$F = (1 - \gamma_w / \gamma_t) \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \quad (2)$$

6.1.2.- Principios de infiltración.

Modelo simple de infiltración propuesto por Green y Ampt (1911) considerando el talud infinito de la Fig. 6.13.

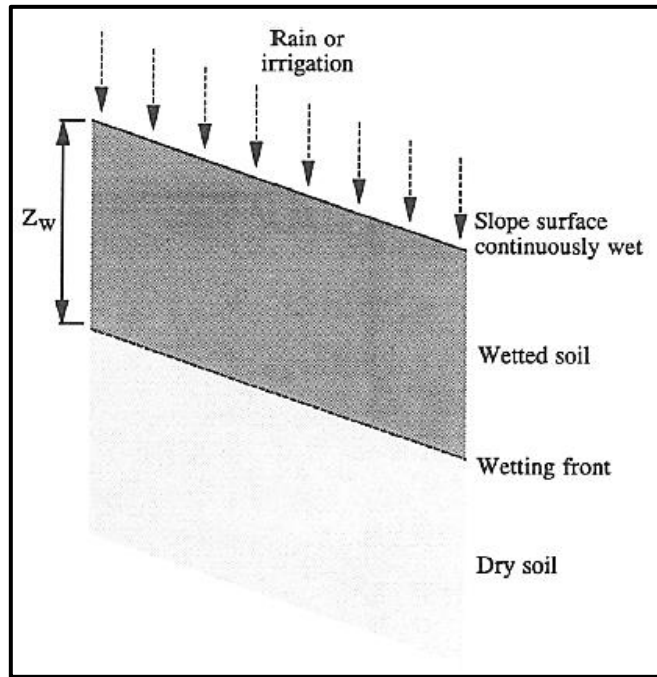


Fig.6.13: Sección transversal muestra el área húmeda por lluvia.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

El modelo Green-Ampt se basa en los siguientes supuestos:

- (1) la superficie del suelo está continuamente húmeda.
- (2) hay un frente húmedo distinto al que se muestra en la Fig.6.13.
- (3) el coeficiente de permeabilidad en la zona húmeda, k_w , no cambia con el tiempo.
- (4) hay una presión negativa constante justo por encima del frente húmedo.

De acuerdo con el modelo, el tiempo necesario para saturar el suelo a una profundidad z_w es:

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

Donde, μ =la porosidad húmeda (volumen del espacio de poro rellenable/volumen total del suelo), S =succión capilar del frente húmedo. Note que μ puede ser expresada como la diferencia entre el contenido volumétrico de agua (volumen de agua/volumen total) antes y después de la humectación, esto es, $\theta_w - \theta_i$.

La tasa de infiltración, v_i , es la velocidad a la que el agua entra en la superficie del suelo. El modelo Green-Ampt predice:

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

6.1.3.- Intensidad y duración de lluvias.

Antes que un mecanismo de falla del tipo descrito por Skempton y DeLory (1957) con la infiltración paralela a la cara del talud pueda ocurrir, el suelo debe llegar a la saturación. La primera condición para la saturación requiere que la intensidad de la lluvia, I , debe ser mayor que la tasa de infiltración, v_i , [(4)]. La segunda condición requiere que la precipitación debe ser más larga que T_w [(3)]. Por lo tanto, estas condiciones requieren que $T \geq T_w$ y $I \geq v_i$. Estas desigualdades proporcionan un requisito mínimo para la saturación a una profundidad z_w :

$$T_{mín} = T_w \quad (5a)$$

$$I_{mín} = v_i \quad (5b)$$

Combinando (3), (4) y (5) es posible relacionar $I_{mín}$ y $T_{mín}$:

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

Combinando (4) y (6) se obtiene la siguiente expresión de umbral de permeabilidad:

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

Donde, k_{lim} = la máxima permeabilidad que permitirá la saturación a la profundidad z_w .

Los datos estadísticos de las intensidades de precipitación para los sectores en estudio se muestran a continuación.

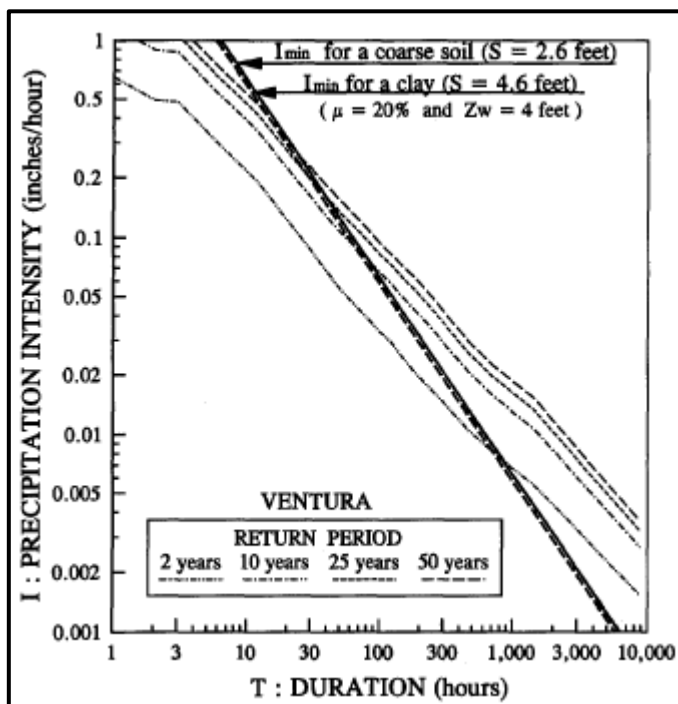


Fig. 6.14: Intensidad mínima v/s Precipitación máxima para varios periodos de retorno en Ventura.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

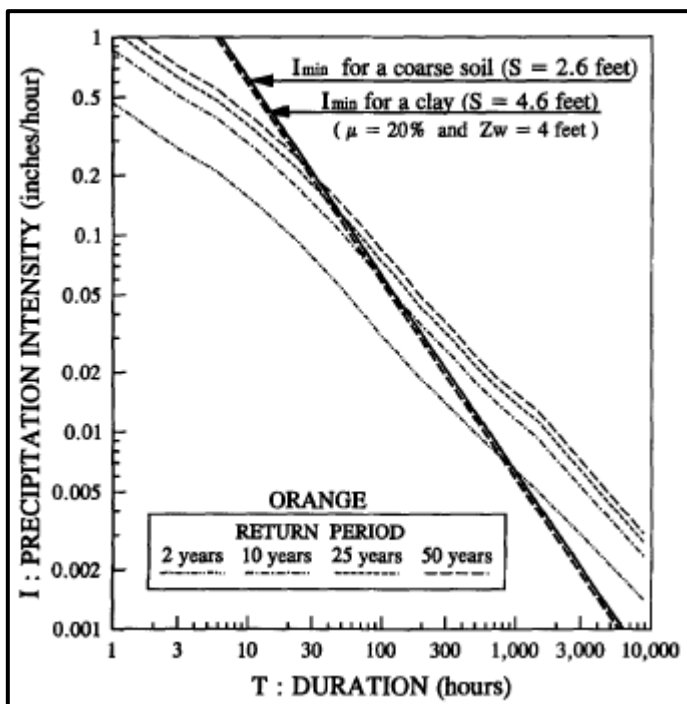


Fig. 6.15: Intensidad mínima v/s Precipitación máxima para varios periodos de retorno en Orange.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

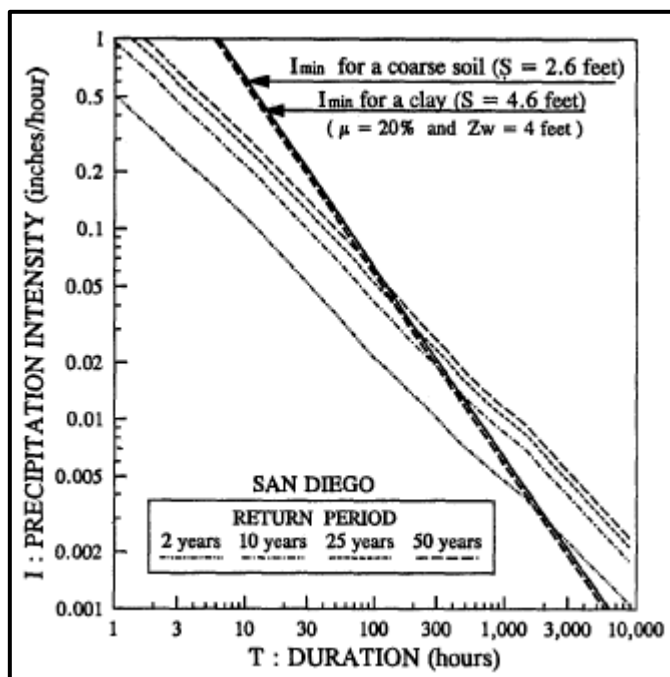


Fig. 6.16: Intensidad mínima v/s Precipitación máxima para varios periodos de retorno en San Diego.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

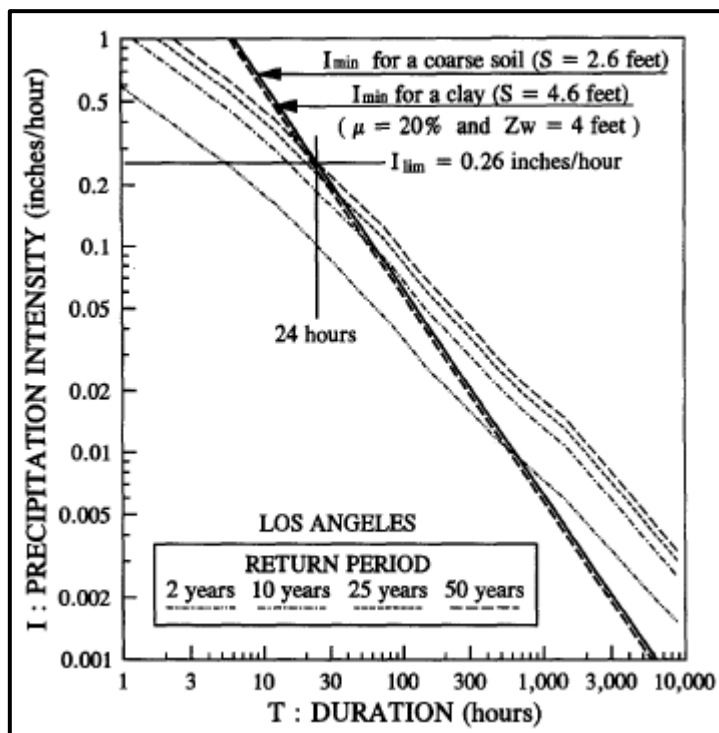


Fig. 6.17: Intensidad mínima v/s Precipitación máxima para varios periodos de retorno en Los Ángeles.
(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

Los umbrales de permeabilidad para suelos de grano grueso y para arcillas en todas las localidades de estudio se muestran a continuación.

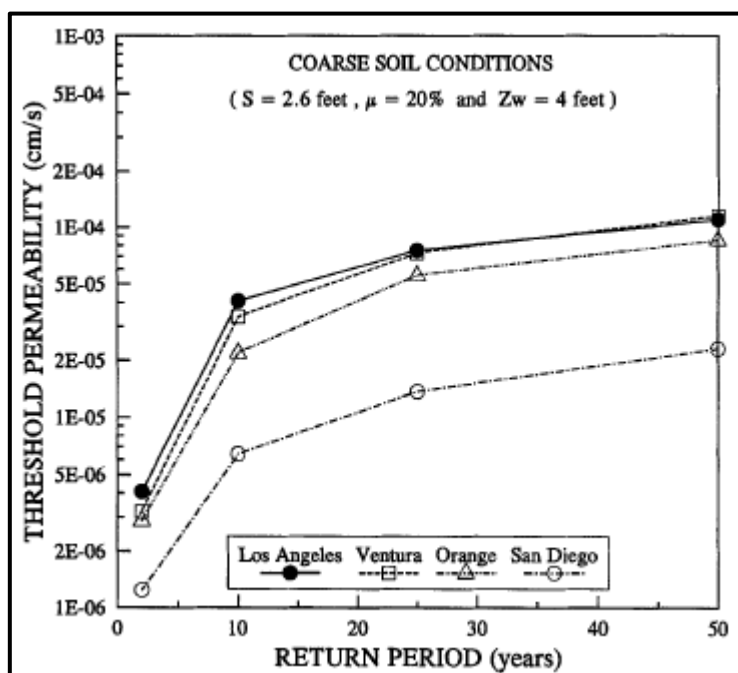


Fig. 6.18: Umbral de permeabilidad para suelos de grano grueso (Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

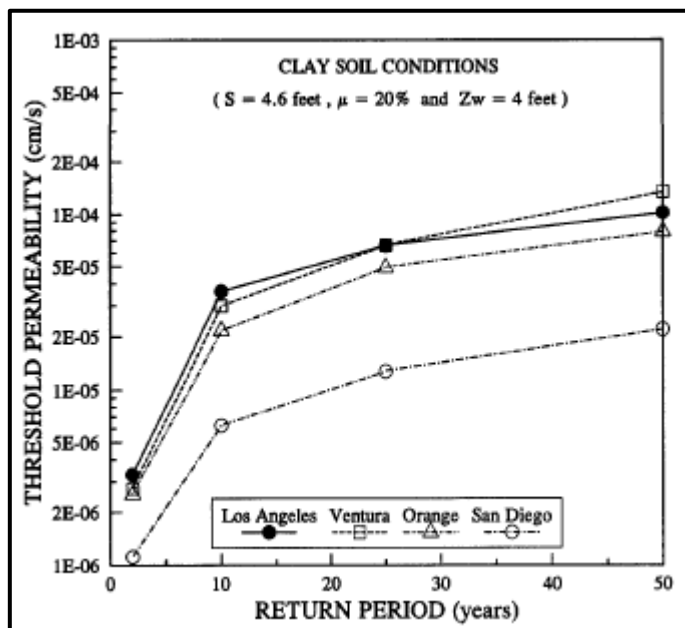


Fig. 7.19: Umbral de permeabilidad para suelos de arcilla.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

6.1.4. Análisis de taludes hechos de suelos muy permeables.

En los taludes hechos de materiales muy permeables una lluvia capaz de saturar la pendiente es improbable. A falta de un flujo paralelo a la pendiente (1) y (2) se convierten respectivamente en:

$$F = \frac{c' + \gamma_t z_w \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma_t z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (10)$$

$$F = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \quad (11)$$

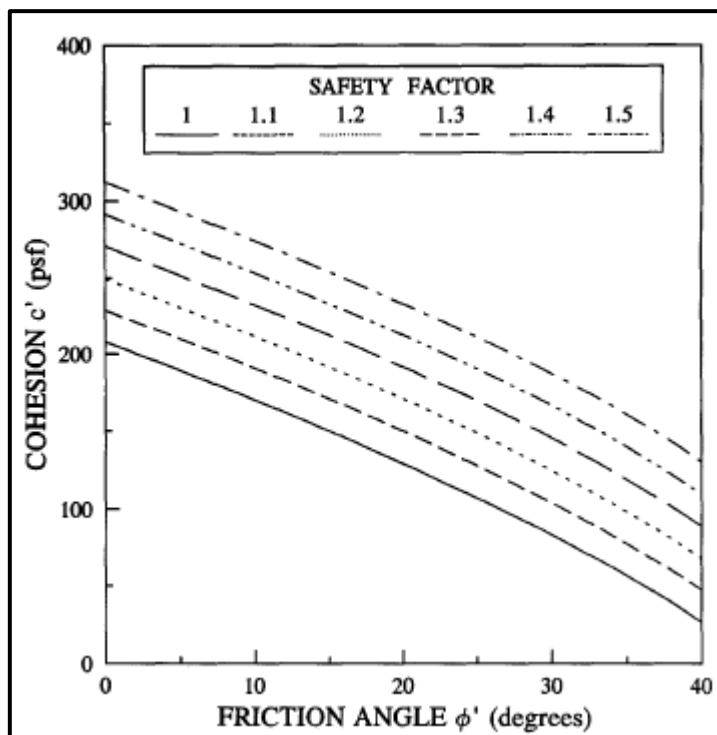


Fig.6.20: Factor de seguridad en taludes donde el flujo paralelo se puede desarrollar.
(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

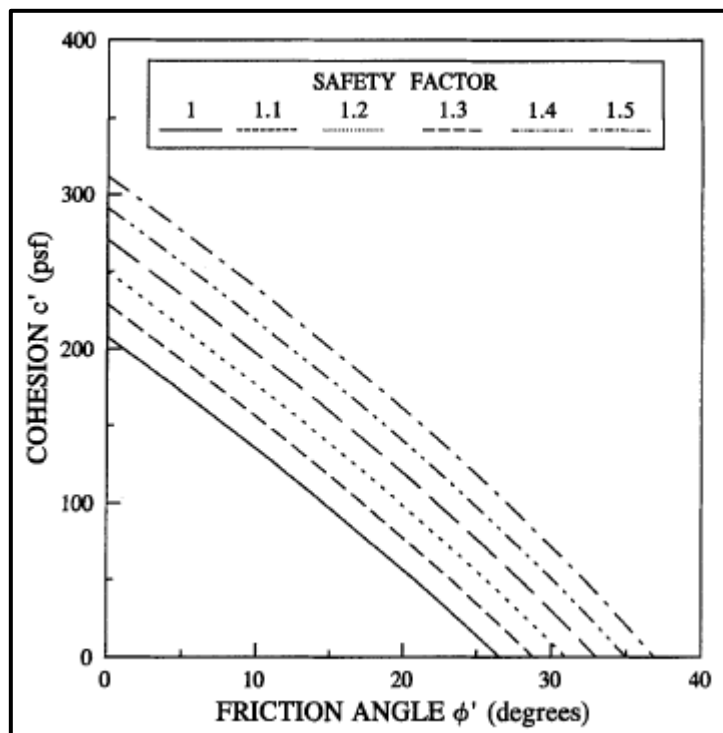


Fig. 6.21: Factor de seguridad en taludes donde el flujo paralelo no se puede desarrollar.
(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

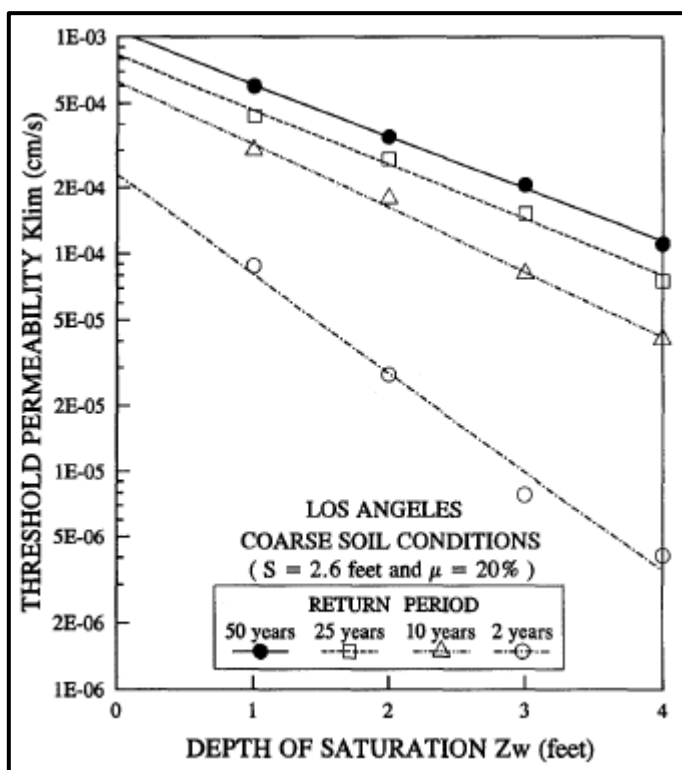


Fig. 6.22: Umbrales de permeabilidad klim para diferentes profundidades de saturación zw.

(Fuente: D. Pradel y G. Raad, 1991)

6.2. - J. Kim, S. Jeong, S. Park y J. Sharma, 2004.

6.2.1.- Calculo de succión.

	k_s (m/s)	θ_i (%)	θ_s (%)	S (%)	S_r (%)	ϕ^b (°)		
						Loose	Medium	Dense
SW	7.08×10^{-7}	23.2	43.1	52	18	10.9	12.9	15.1
SM	1.30×10^{-7}	18.5	43.5	39	19	6.6	7.8	9.1

Fig.6.23: Propiedades de suelo en estudio. (Fuente: J. Kim y otros, 2004)

La ecuación SWCC se determinó teniendo en cuenta las relaciones propuestas por Van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994):

$$\theta = \left[\frac{1}{\ln\{e+(\psi/a)^n\}} \right]^m \quad (8)$$

$$\theta = \left[\frac{1}{1+(\psi/a)^n} \right]^m \quad (9)$$

e = base del logaritmo natural.

a, m ,n = constantes que controlan la posición y la forma de la SWCC.

$$\theta = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

θ_w = Contenido volumétrico de agua.

θ_r y θ_s = Contenido volumétrico de agua residuales y saturados, respectivamente.

Para definir la SWCC de los suelos en estudio se realizó la prueba de papel de filtro como se especifica en la norma ASTM D5298-94 (ASTM, 2000). Se utilizaron dos tipos de papel filtro, Schleicher y Schuell N°589 y Whatman N°42. Se encontró que las pruebas realizadas con Whatman N°42 de papel de filtro mostraron una respetabilidad superior y dieron SWCC que eran consistentes con SWCC para suelos arenosos.

Filter paper	Parameter	Van Genuchten (1980)		Fredlund and Xing (1994)	
		SW	SM	SW	SM
Whatman No. 42	<i>a</i>	22	66	128	136
	<i>n</i>	1.95	1.53	0.86	1.2
	<i>m</i>	0.27	0.69	2.7	2.9
Schleicher & Schuell No. 589	<i>a</i>	17	53	78	163
	<i>n</i>	1.25	1.22	0.72	0.9
	<i>m</i>	0.45	0.92	2.9	4.9

Fig.6.24: parámetros para la SWCC de los suelos en estudio, ajuste de curva.

(Fuente: J. Kim y otros, 2004)

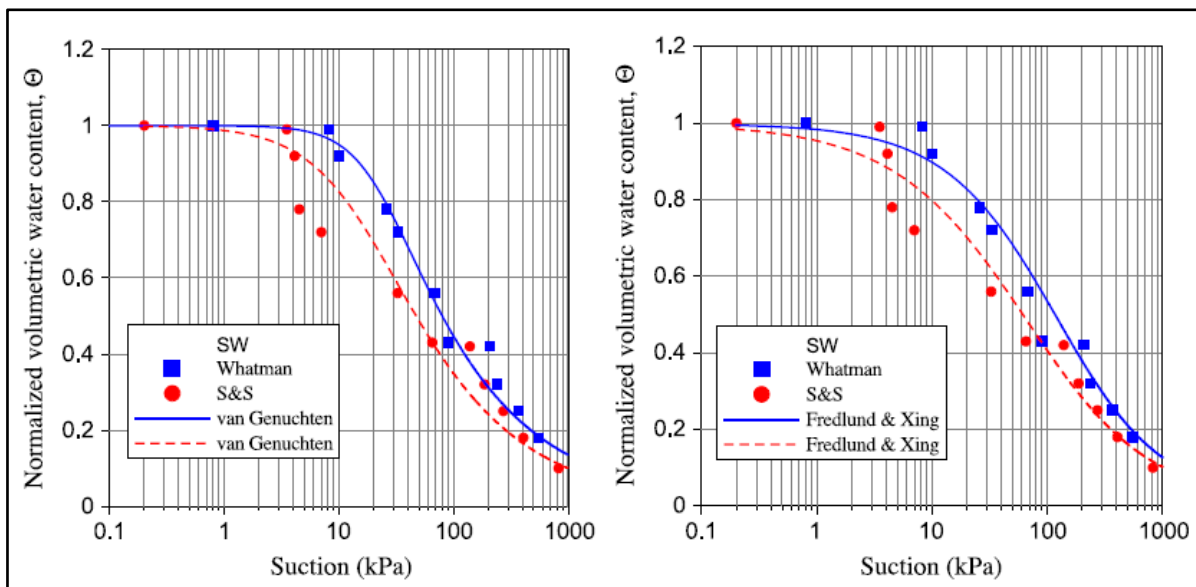


Fig.6.25: SWCC para suelo tipo SW. (Fuente: J. Kim y otros, 2004)

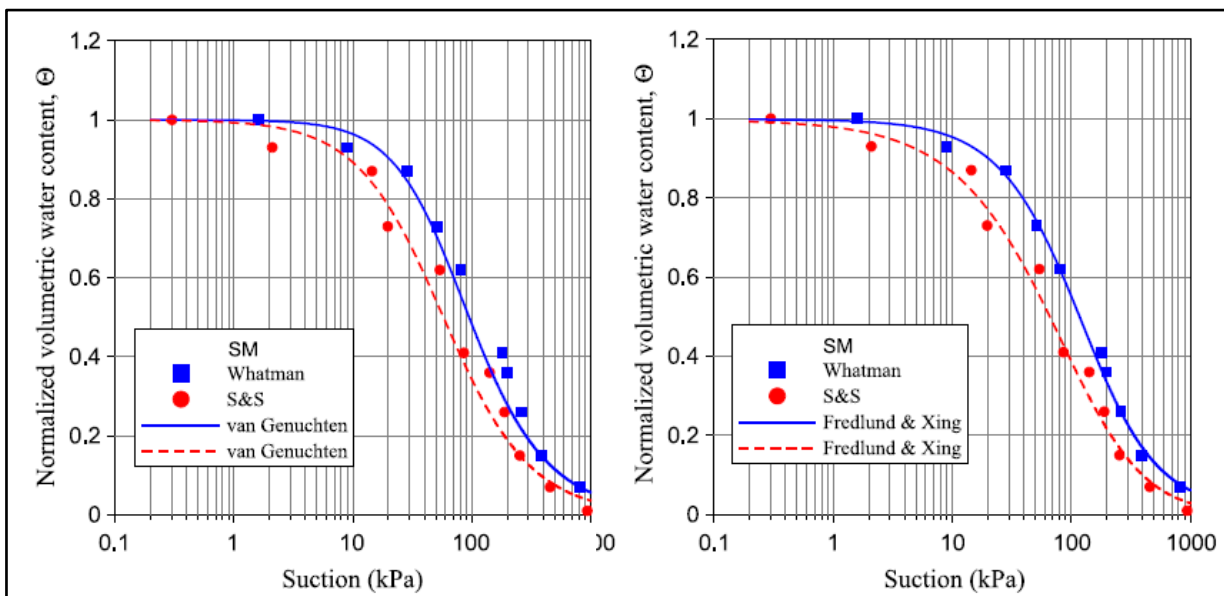


Fig.6.25: SWCC para suelo tipo SM. (Fuente: J. Kim y otros, 2004)

6.2.2.- Resultados Análisis teóricos y numérico.

Dos taludes infinitos con 27° y 45° de inclinación se modelaron en el programa. Mediante la especificación de 100% de grado de saturación dentro del frente húmedo, la influencia de la profundidad del frente húmedo en la estabilidad de la pendiente es relevante cuando el frente de humectación alcanza profundidades mayores a 120 cm y menores a 200 cm. Más allá de una profundidad de 200 cm del frente húmedo, el factor de seguridad cambió de manera insignificante a medida que este penetra más.

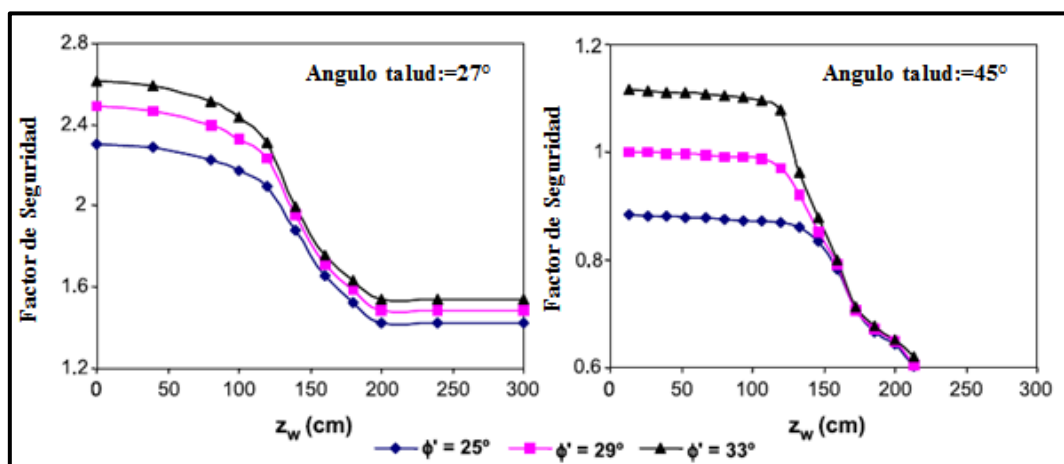


Fig.6.26: influencia de la profundidad del frente húmedo en el factor de seguridad.

(Fuente: J. Kim y otros, 2004)

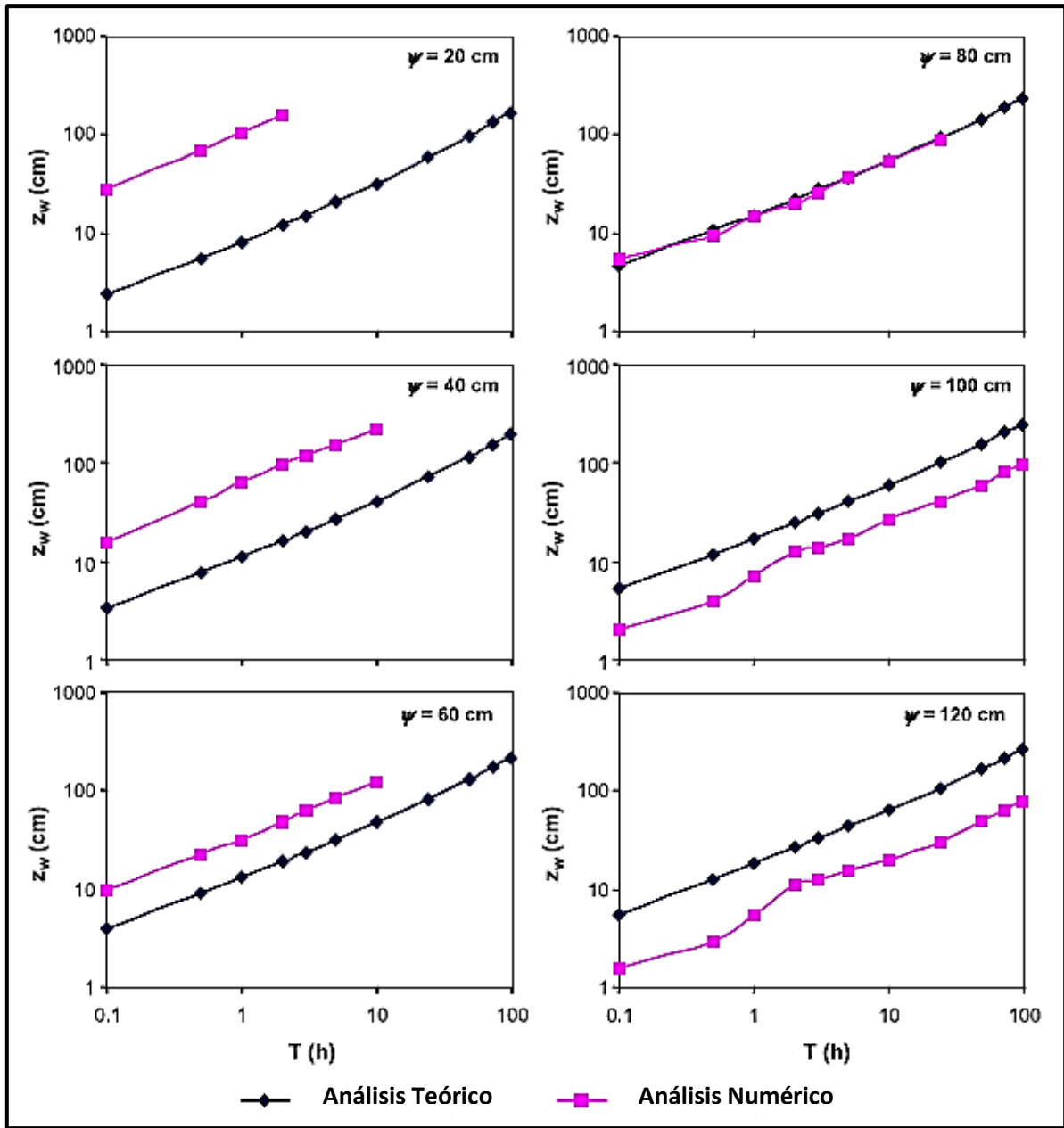


Fig.6.27: Variación del frente húmedo con la duración de la lluvia para suelo tipo SW con diferentes valores de succión. (Fuente: J. Kim y otros, 2004)

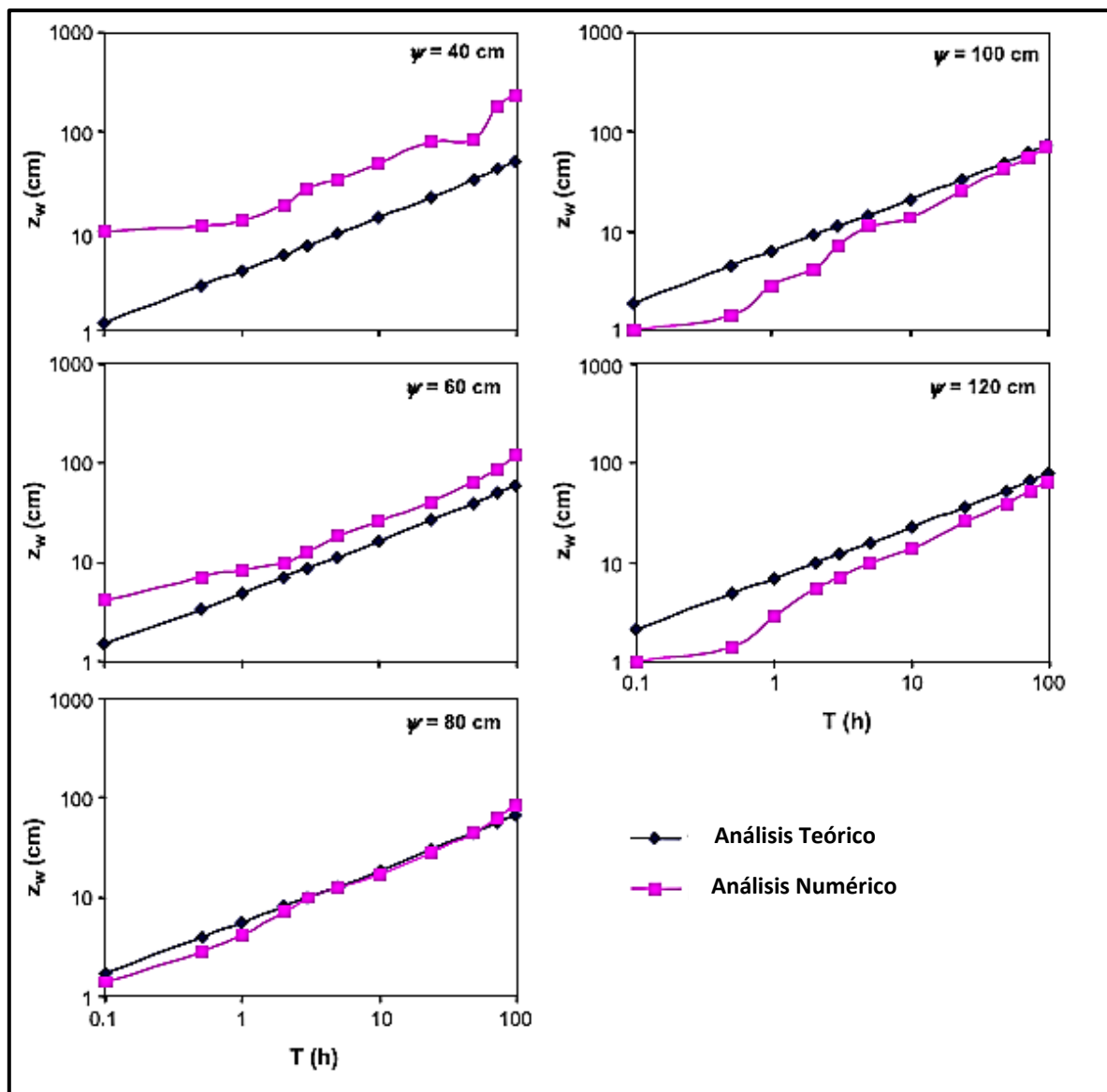


Fig.6.28: Variación del frente húmedo con la duración de la lluvia para suelo tipo SM con diferentes valores de succión. (Fuente: J. Kim y otros, 2004)

Type	ρ (g/cm ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Loose	1.7	10	25
Medium	1.8	10	29
Dense	1.9	10	33

Fig.6.29: Parámetros de resistencia de los suelos erosionados.

(Fuente: J. Kim y otros, 2004)

6.3.- K. Gavin y J. Xue, 2007

6.3.1.- Curva característica de agua en el suelo (SWCC), Zhan y Ng.

Zhan y Ng describen la forma general de la SWCC mostrada en la Fig.6.30, que muestra el contenido de agua variando de la condición totalmente saturada con succión cero, a un contenido de agua residual con alta succión.

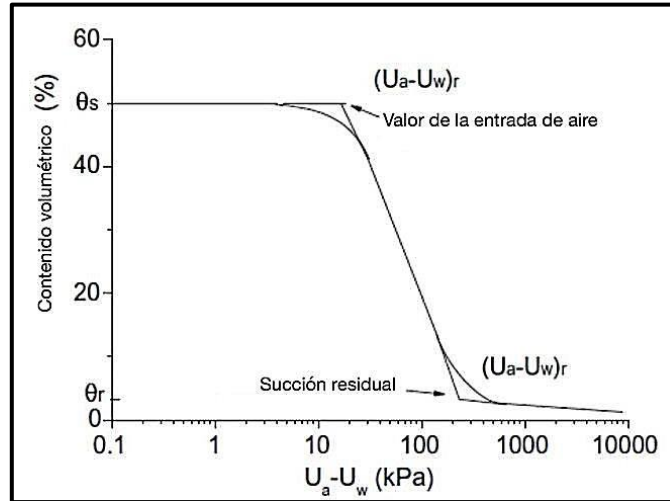


Fig.6.30: Curva característica de agua en el suelo típica. (Fuente: K. Gavin y J. Xue, 2007)

6.3.2.- Modelo numérico.

La capacidad de infiltración a la profundidad y se puede expresar como:

$$i = K \frac{S_y}{y} \quad (11)$$

Durante la etapa inicial de la infiltración cuando los valores de succión están al máximo y el talud tiene una gran capacidad de infiltración, que es mayor que la intensidad de la lluvia. De la Eq (11) tenemos:

$$(S_y/y)K > I_r \quad (12), \text{ reescribiendo,}$$

$$S_y > (I_r/K)y \quad (13)$$

Así valores de succión más grande que $(I_r/K)y$, indica que la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia. La relación I_r/K , se denomina intensidad de lluvia relativa (R_i)

Si dividimos el perfil de succión del suelo en dos zonas con la línea $S_y = (I_r/K)y$ (Fig.7.31) en el que los valores de succión se indican en metros de agua. En la zona 1 tenemos:

$$S_y > (I_r/K)y$$

En esta zona, la razón de infiltración es controlada por la intensidad de la lluvia I_r y por toda el agua que se infiltrará en el suelo.

Considerando la zona 2 en la Fig.7.31 tenemos:

$$S_y < (I_r/K)y$$

$$i = (S_y/y)K < I_r r \quad (9)$$

En esta zona la capacidad de infiltración es menor que la intensidad de la lluvia. Es así que la tasa de infiltración es controlada por la capacidad de infiltración real, la que está determinada por la carga de succión y la permeabilidad del suelo.

6.3.3.- Caso de estudio.

El talud considerado formaba parte de un proyecto carretera y tenía 17.5m de alto con ángulo de pendiente de 30°. La instrumentación incluye sensores de humedad y tensiómetros. Lo que permitió la recopilación del contenido de humedad y mediciones de succión a través de una estación húmeda y seca. . El evento comienza el 29 de agosto de 2001 y duró aproximadamente 50 horas. El coeficiente de permeabilidad saturada del suelo K_s es $7.7 \times 10^{-6} \text{m/s}$. La intensidad de la lluvia fue de $1.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ($0.18K_s$) durante este periodo, las mediciones muestran que la escorrentía se produjo durante la precipitación. Valores de succión y contenido de agua medidos a los 2m de profundidad comenzaron a cambiar después de aproximadamente 26 horas de lluvia. El contenido volumétrico inicial y final y los valores de succión se muestran en la Fig.6.31.

Los resultados indican que K varía de $0.1K_s$ al comienzo de la infiltración, a $0.21K_s$ al final de la prueba. El valor medio ($\approx 0.15K_s$) y el valor de $0.5K_s$ se utilizaron para calcular la intensidad de lluvia relativa (R_i) en el nuevo modelo. . La línea $S_y = R_i y$ para estas dos condiciones se presentan en la Fig.6.31. En la figura, el perfil de succión es dividido en dos regiones, por esta línea. En la parte superior derecha, la capacidad de infiltración es más grande que la intensidad de lluvia y en la parte inferior izquierda la capacidad de infiltración es menor que la intensidad de lluvia. El perfil final de succión en la Fig.6.31 es dividido en cuatro segmentos (zona I, II, III, IV) para facilitar el cálculo y mejorar la precisión. Los resultados de los análisis se muestran en la Fig.6.32

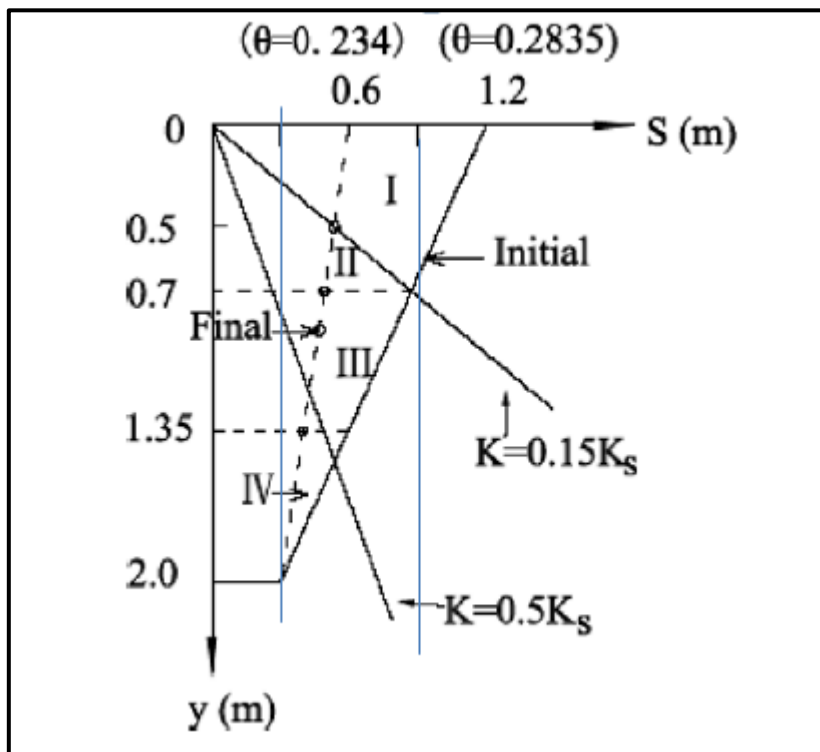


Fig.6.31: Perfil de succión matricial en taludes de suelo degradado.

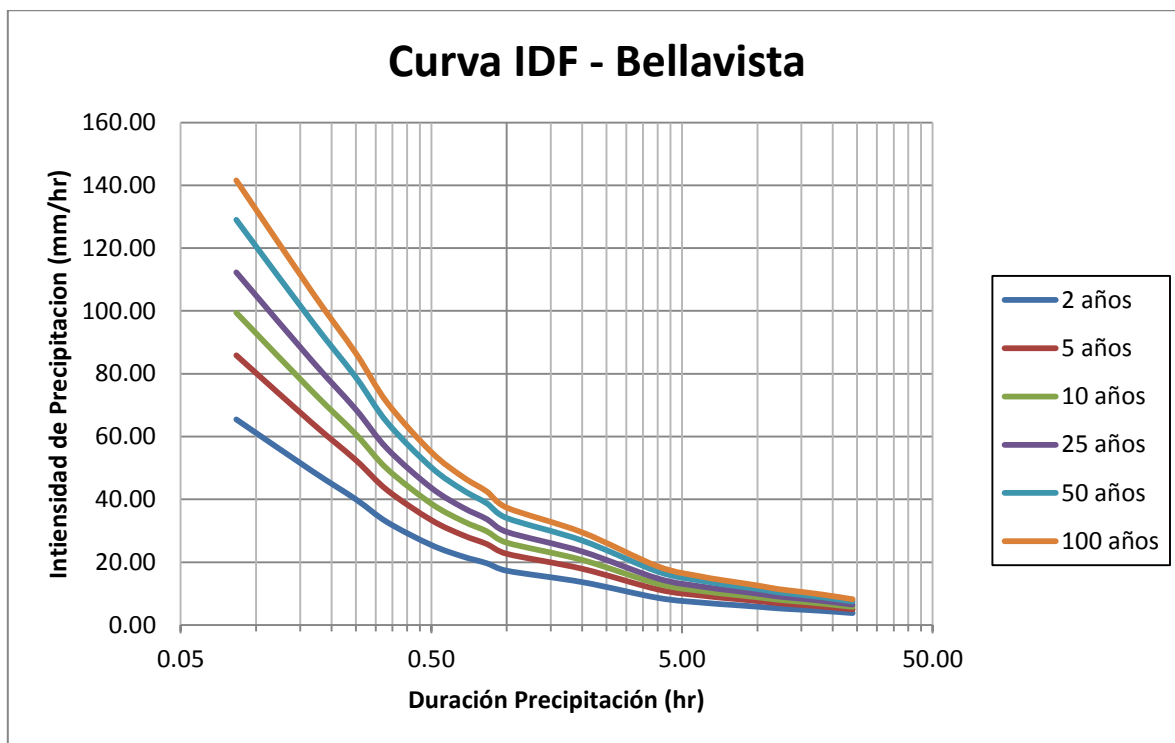
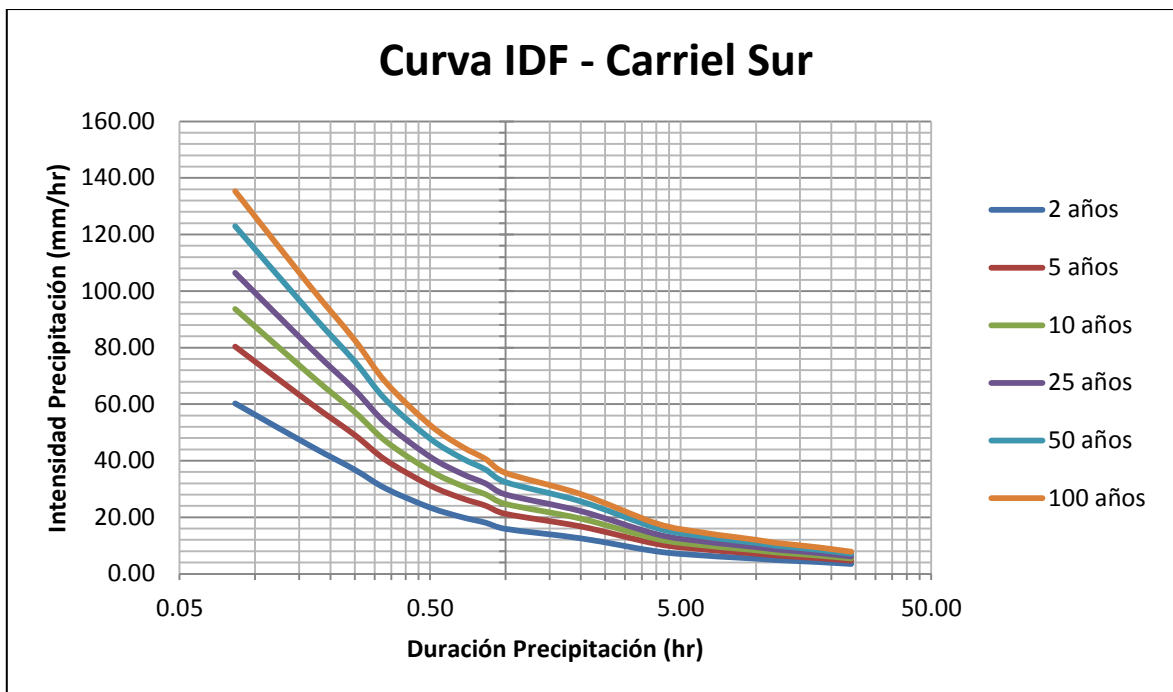
(Fuente: K. Gavin y J. Xue, 2007)

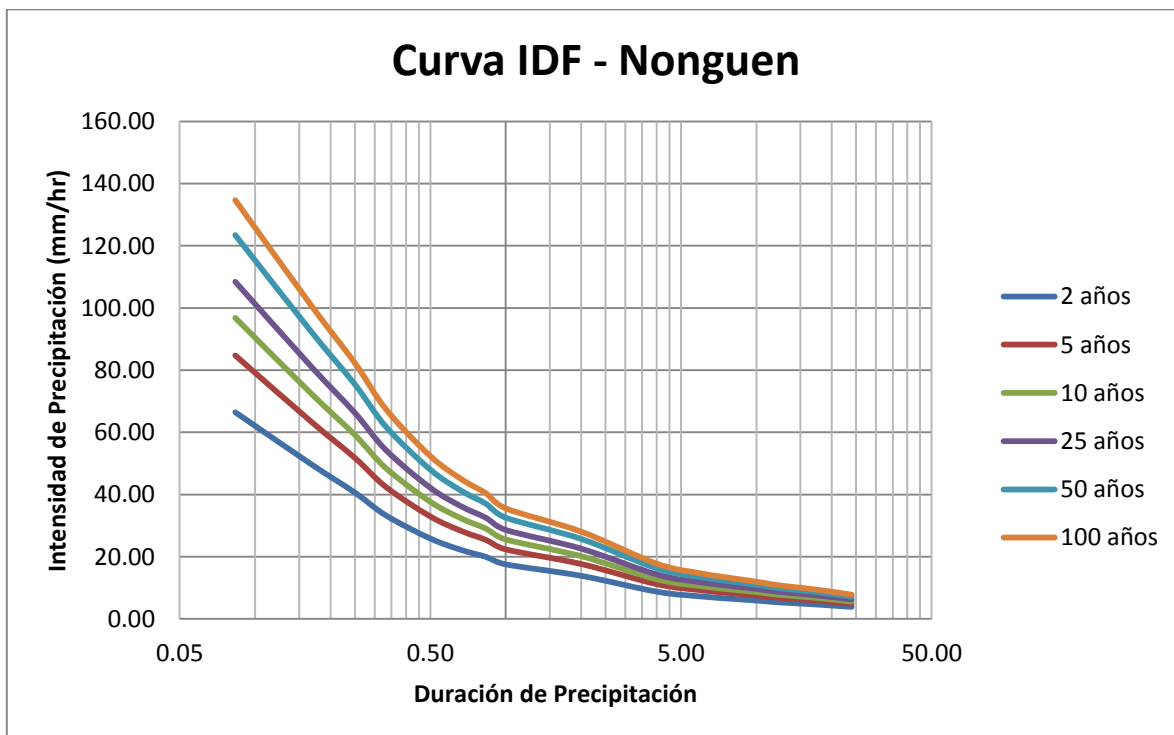
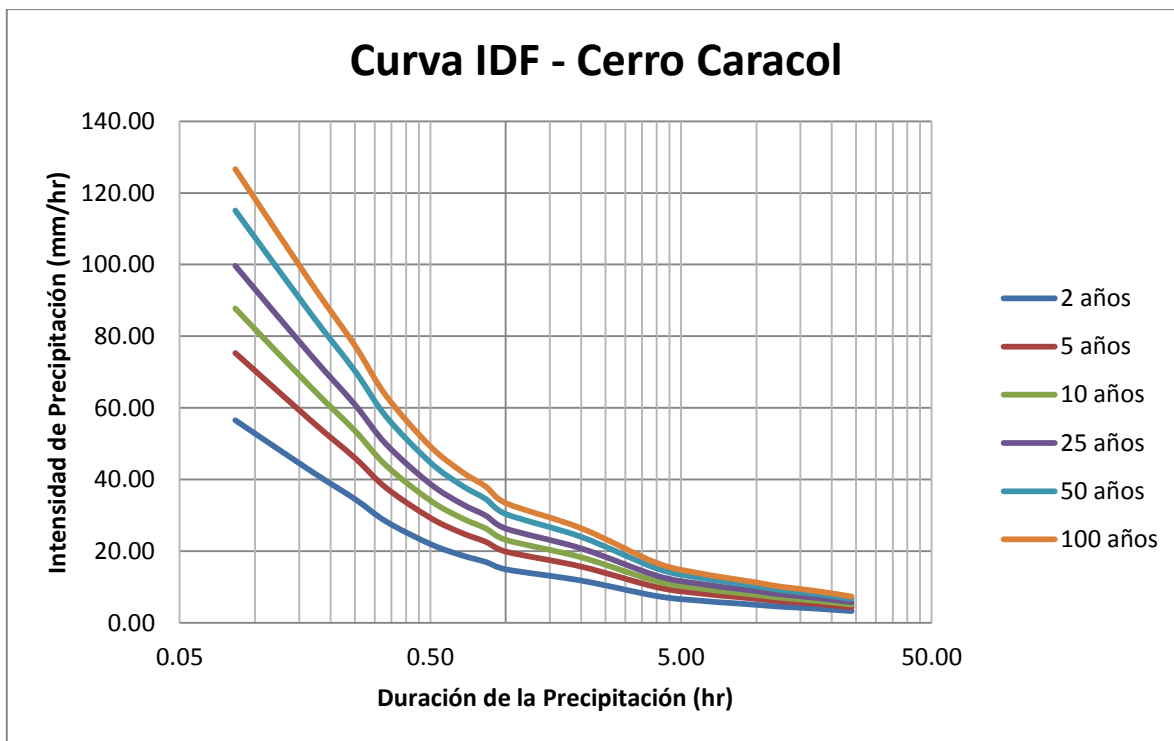
K	Time (h)						
	New model					Green-Ampt	Monitored
	T ₁	T ₂			Total		
		II	III	IV			
0.15K _s	5.2	1.11	9.67	7.02	23.01	8.27	26.25
0.5K _s	3.2			2.1	5.3	2.5	
K _s						1.24	

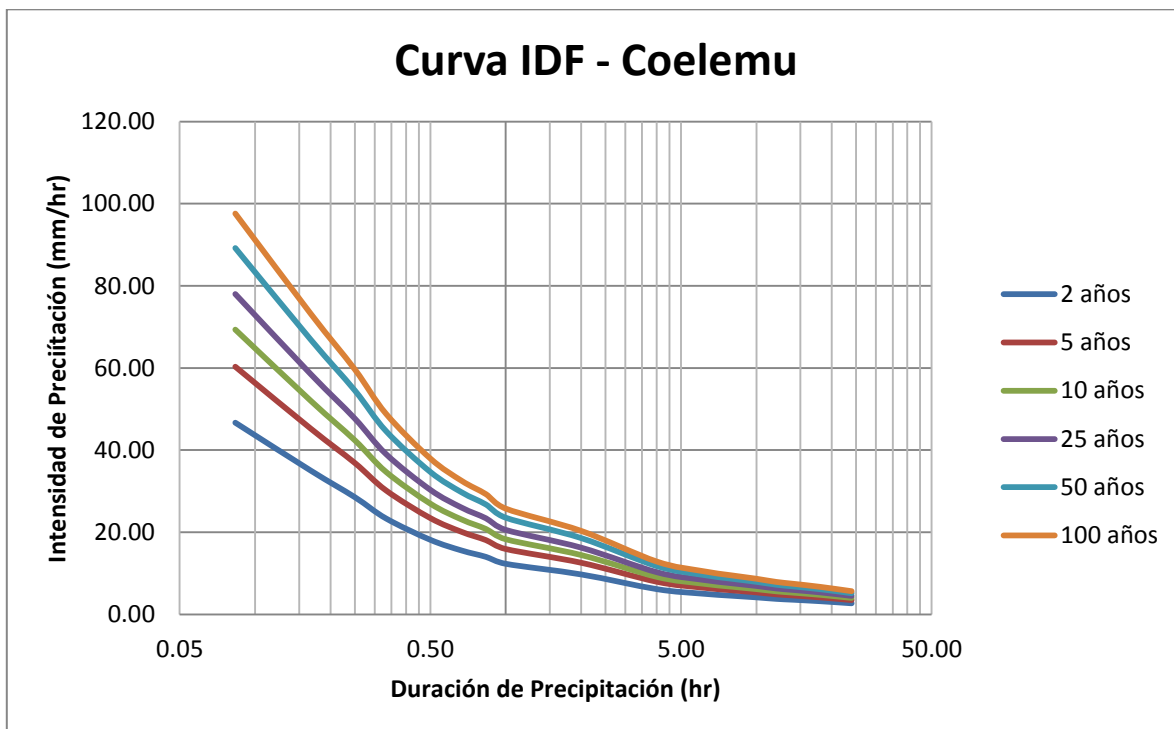
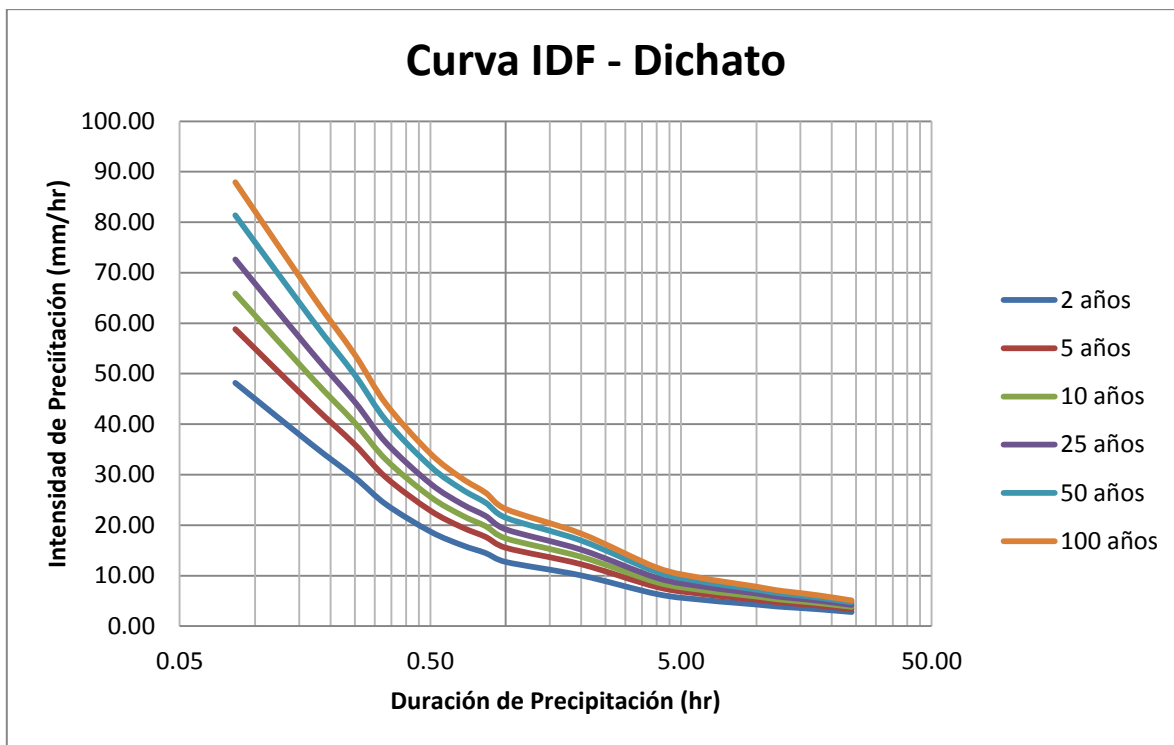
Fig.6.32: Comparación de periodos de infiltración para taludes de suelo degradado.

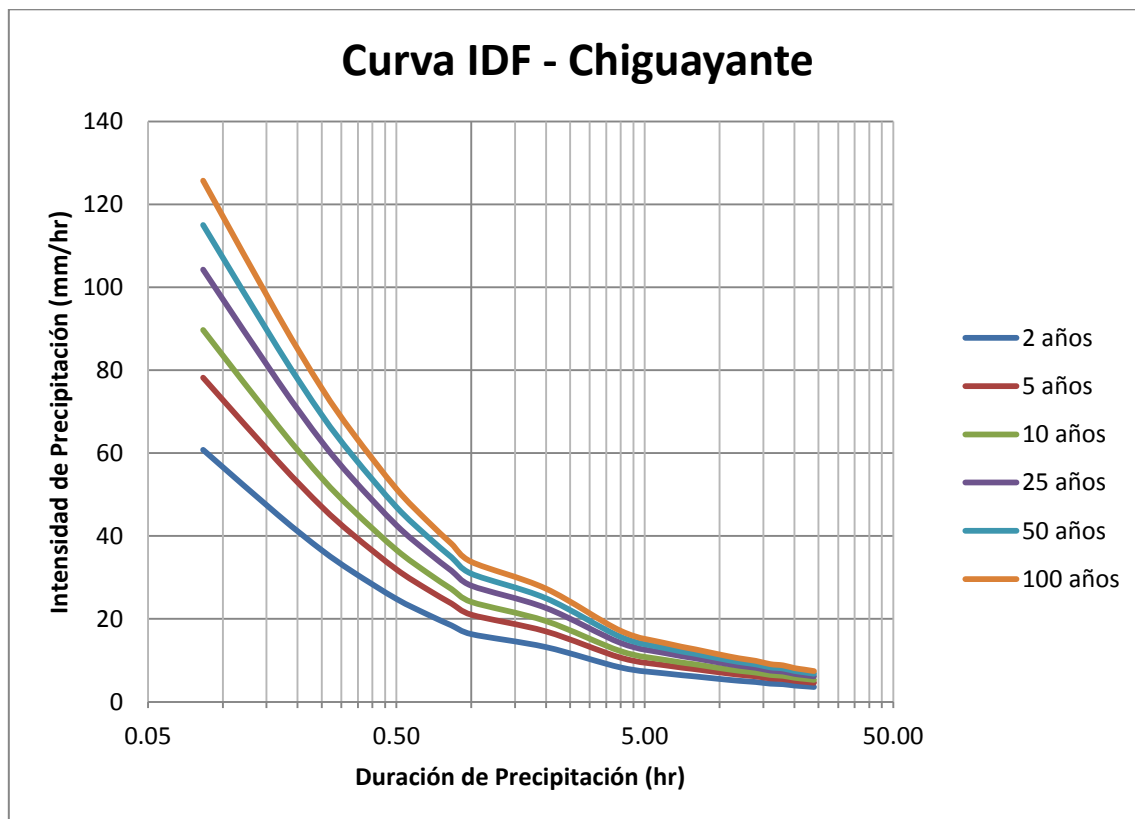
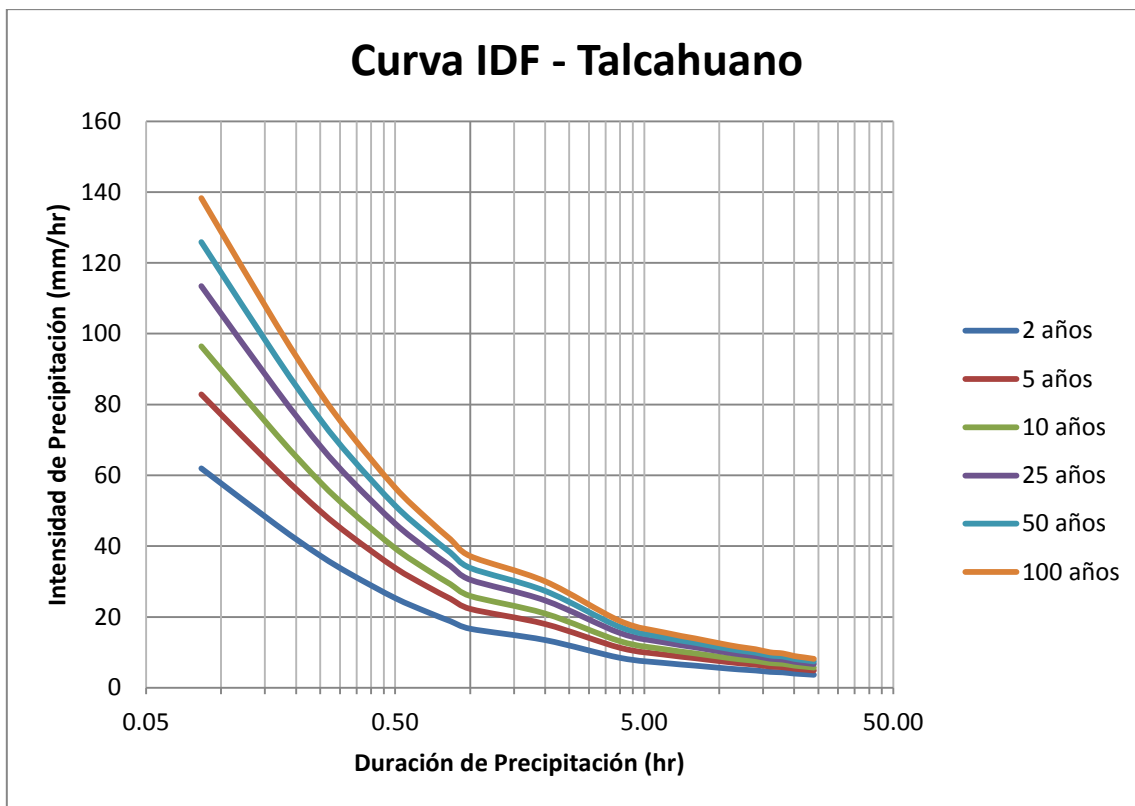
(Fuente: K. Gavin y J. Xue, 2007)

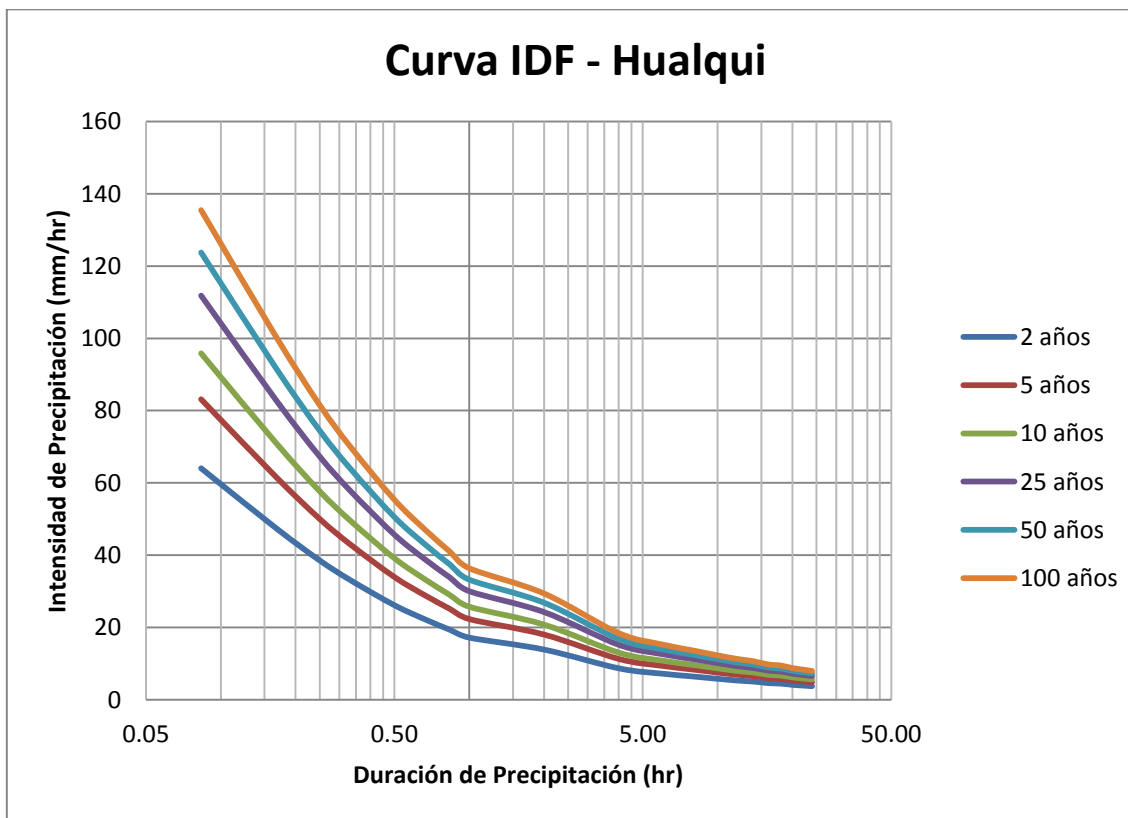
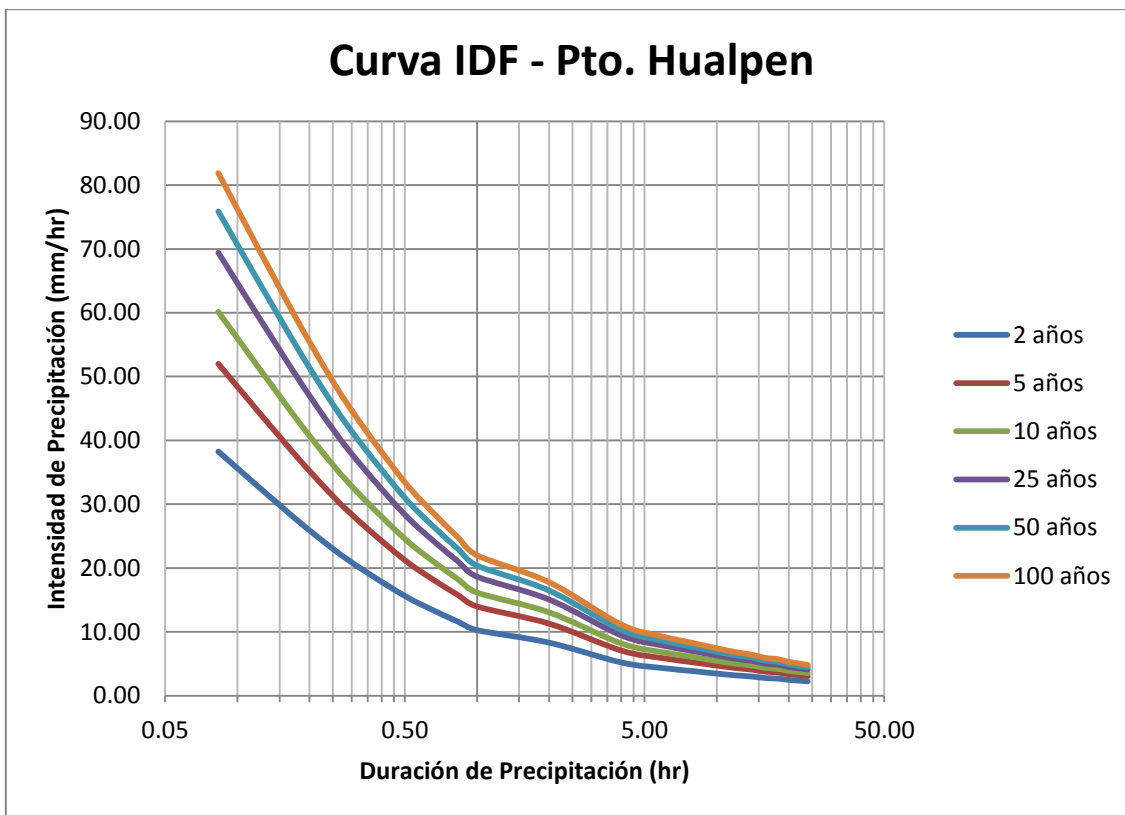
6.4.- Curvas IDF de las estaciones consideradas en este estudio.

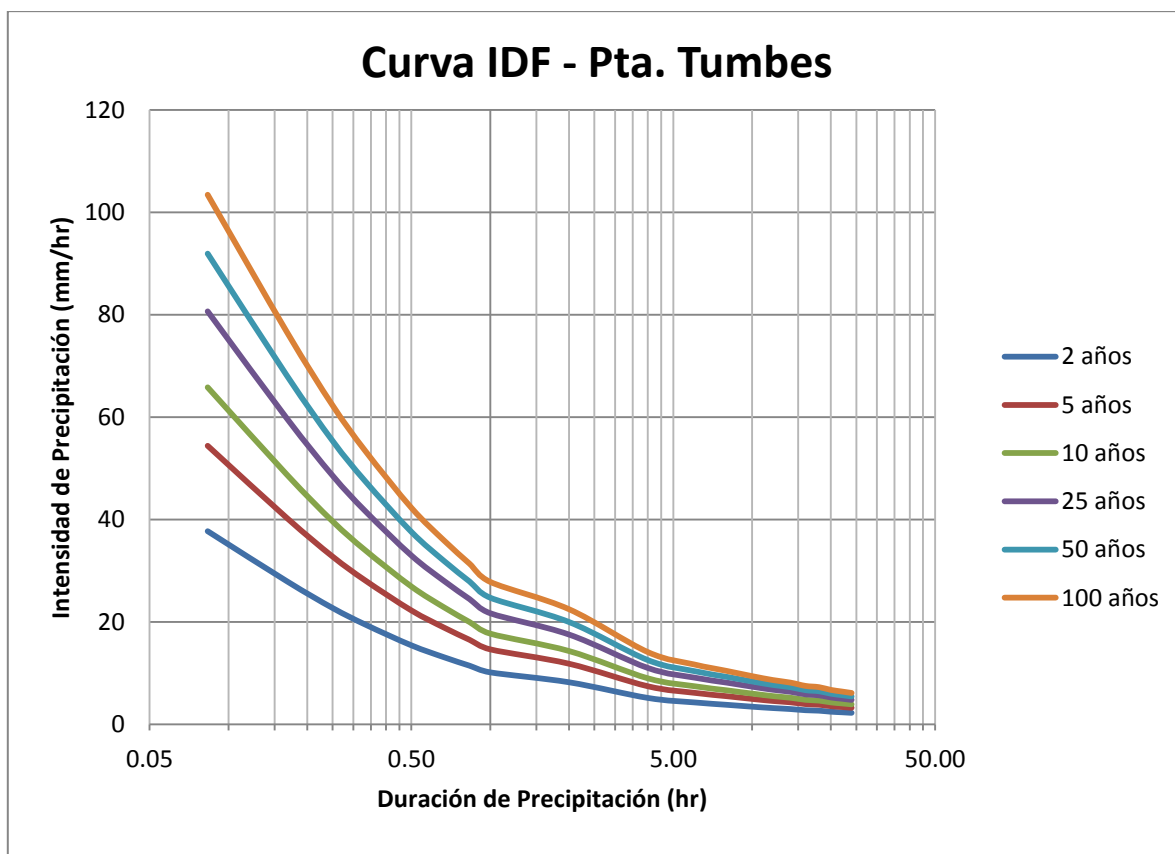












Las curvas IDF mostradas están basadas en los registros de precipitación entregados por la Dirección de Obras Hidráulicas, los cuales se ingresaron al programa Excel para posteriormente graficar y representar de mejor manera la información, dado que las curvas son uno de los parámetros esenciales en la determinación de los umbrales de precipitación.

6.5.- Intersección curvas IDF – curva intensidades mínimas.

A continuación se presenta la intersección de las curvas IDF con la curva de intensidades mínimas calculada según el método propuesto por D. Pradel y G. Raad para cada estación en estudio. Cabe mencionar que para esta instancia los gráficos se formularon en escala semi-logarítmica

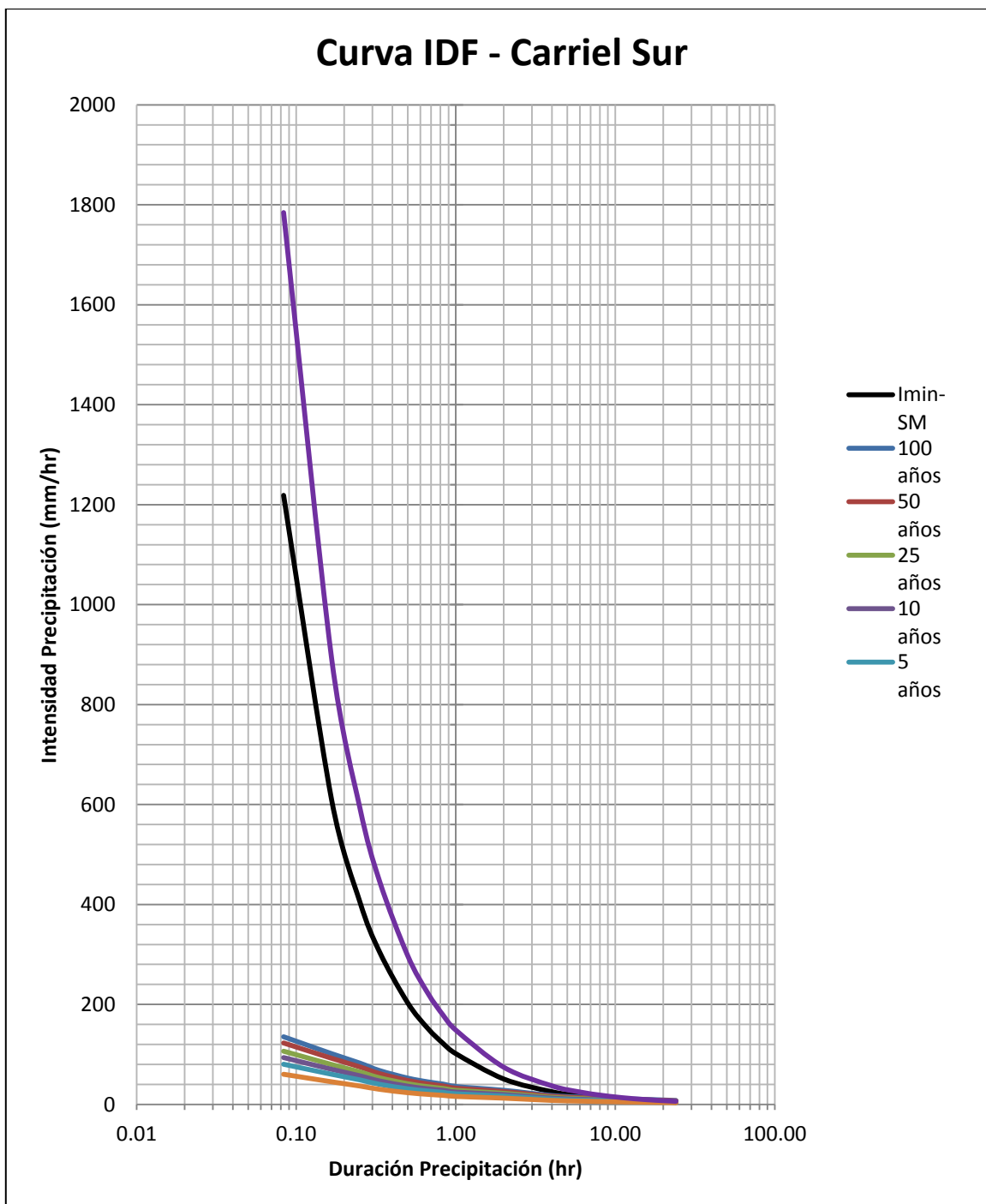


Fig.6.33: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Carriel Sur.

(Fuente: Elaboración Propia)

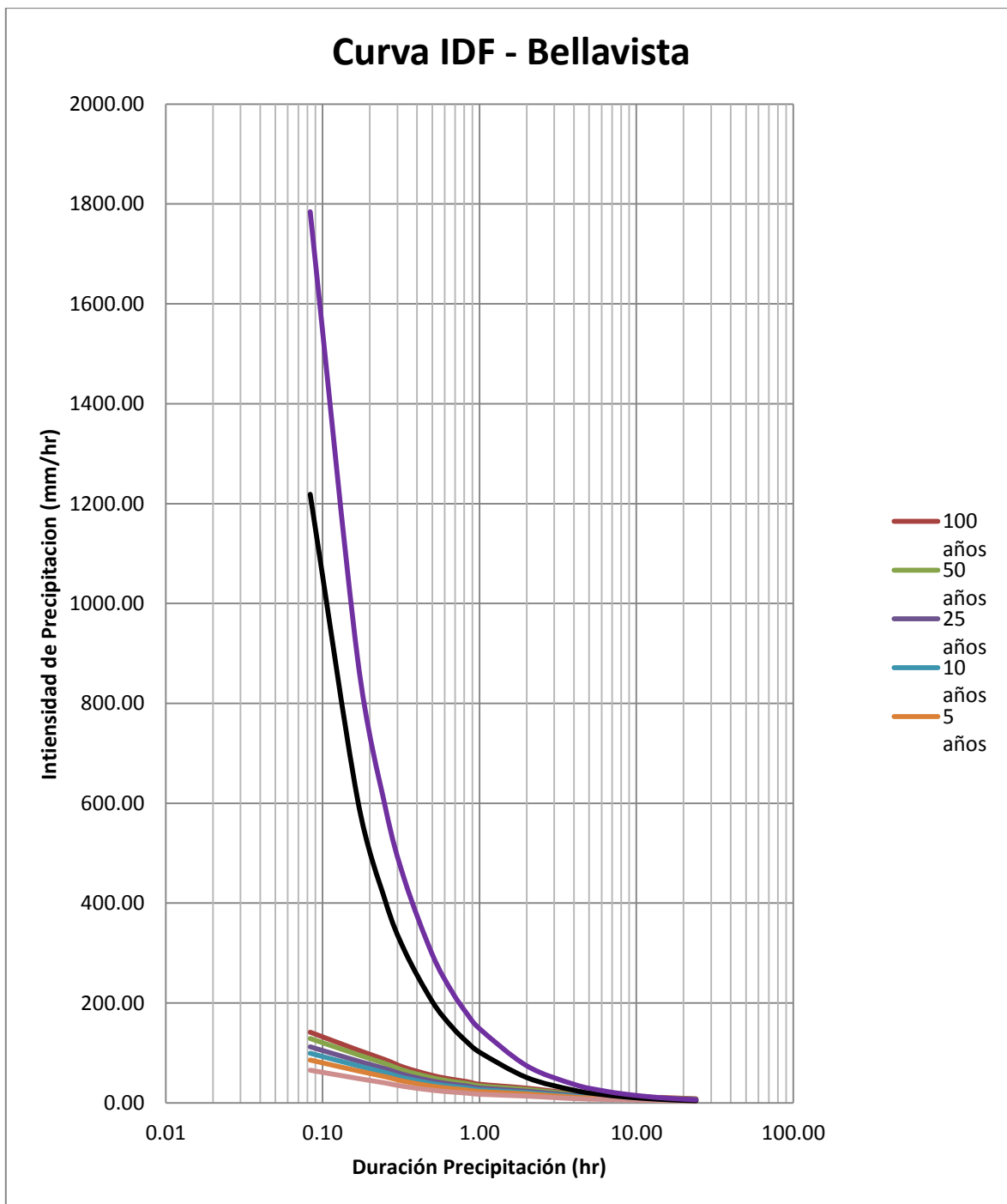


Fig.6.34: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Bellavista.

(Fuente: Elaboración Propia)

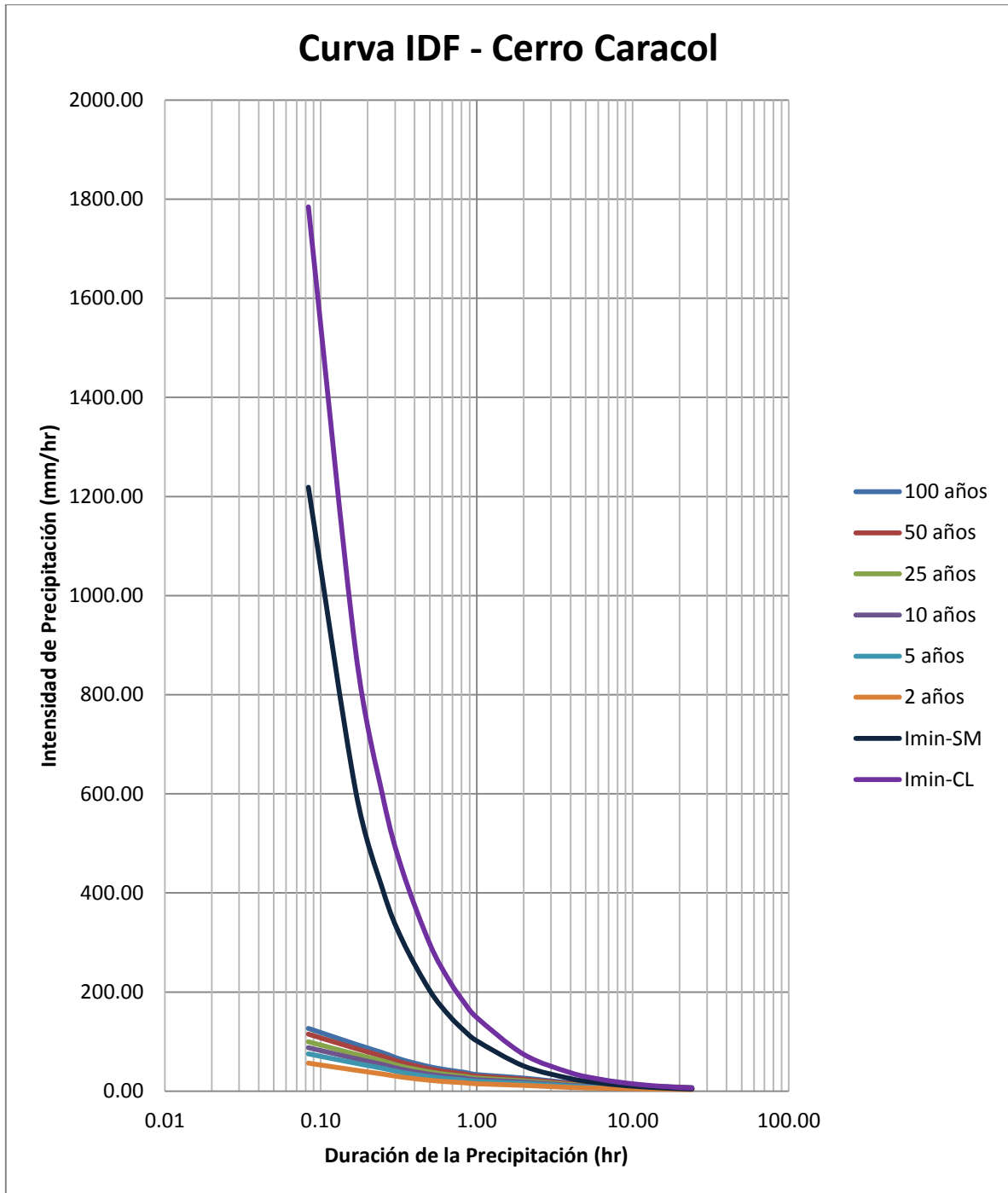


Fig.6.35: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Cerro Caracol.

(Fuente: Elaboración Propia)

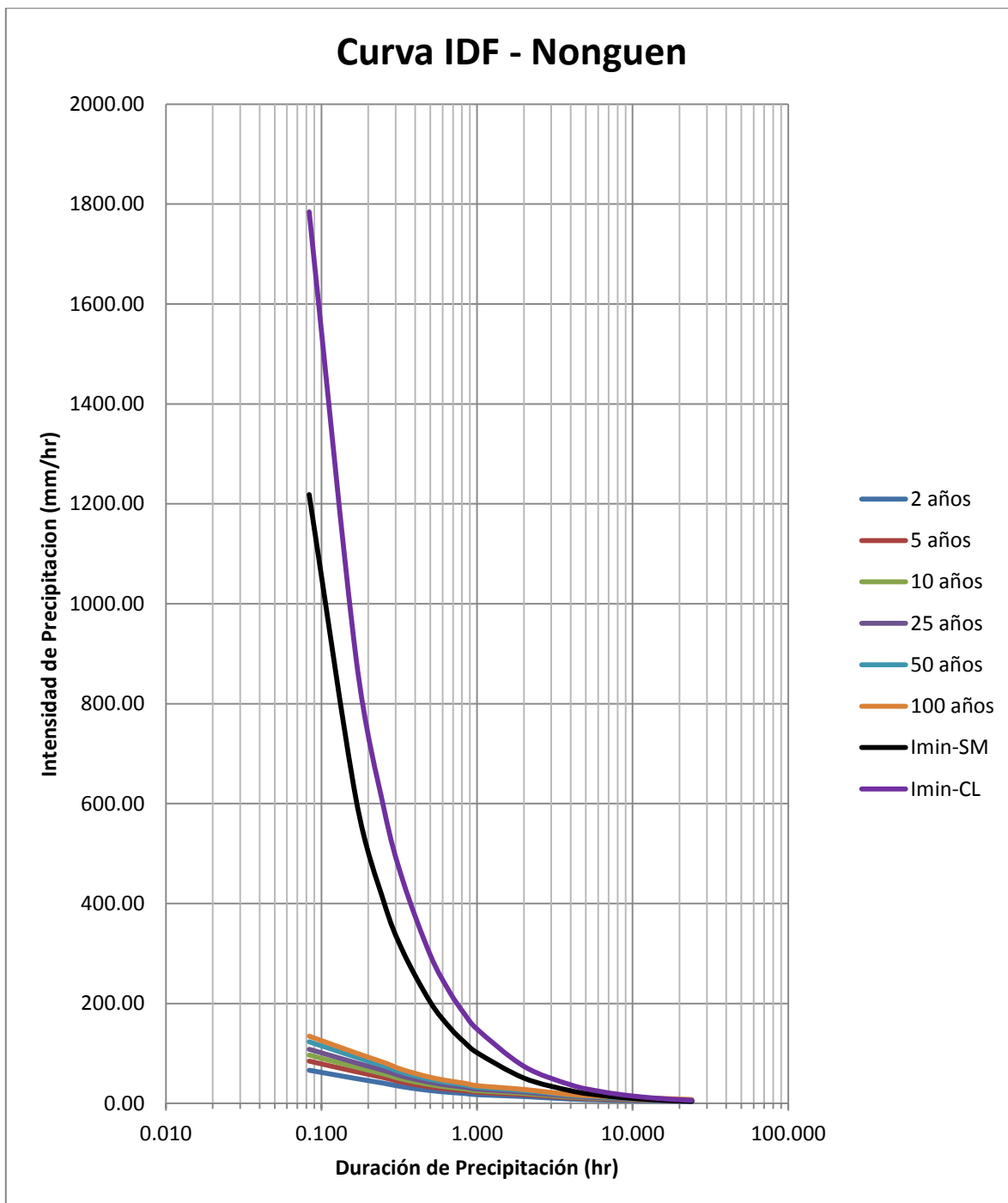


Fig.6.36: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Nonguen.

(Fuente: Elaboración Propia)

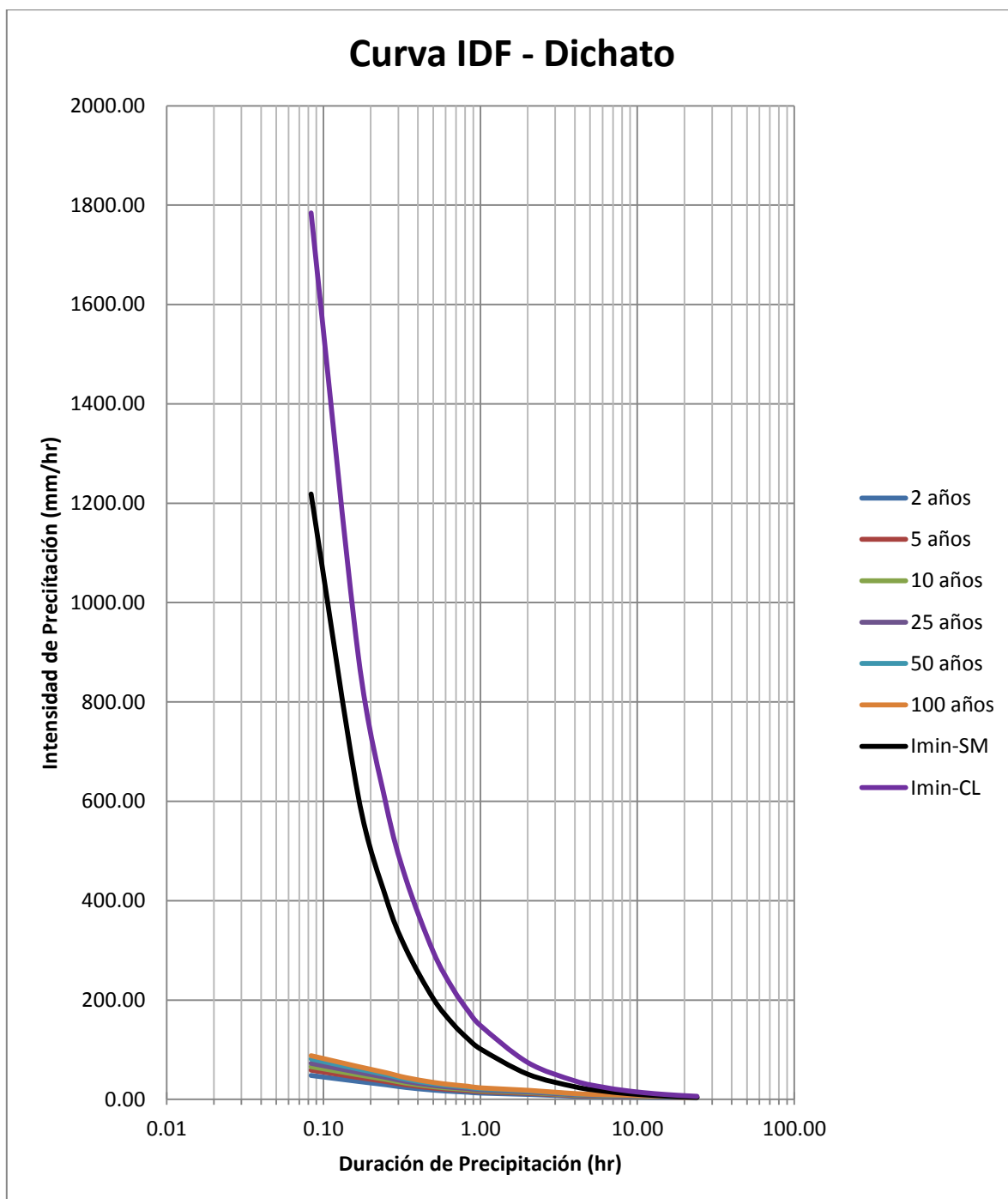


Fig.6.37: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Dichato.

(Fuente: Elaboración Propia)

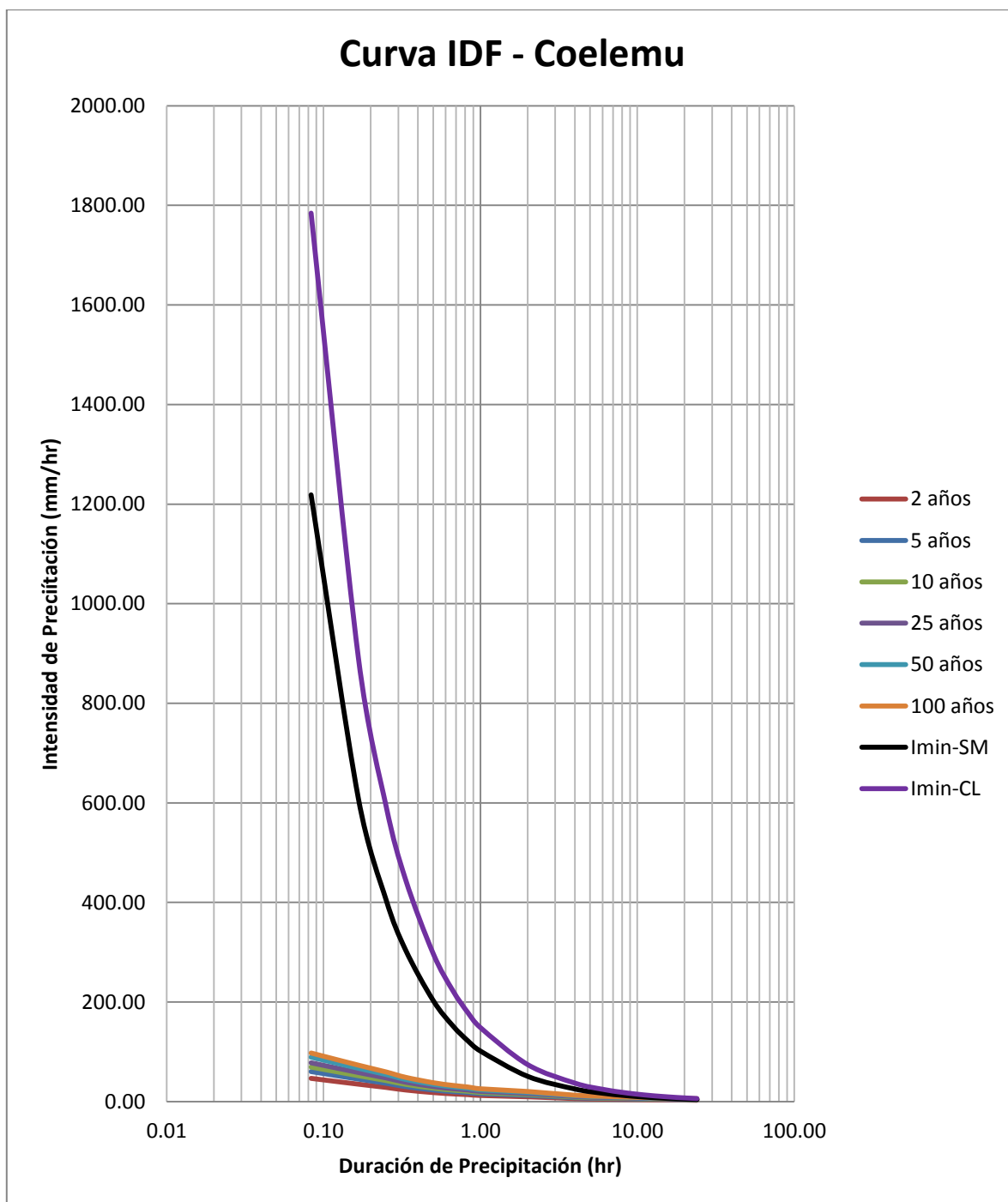


Fig.6.38: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Coelemu.

(Fuente: Elaboración Propia)

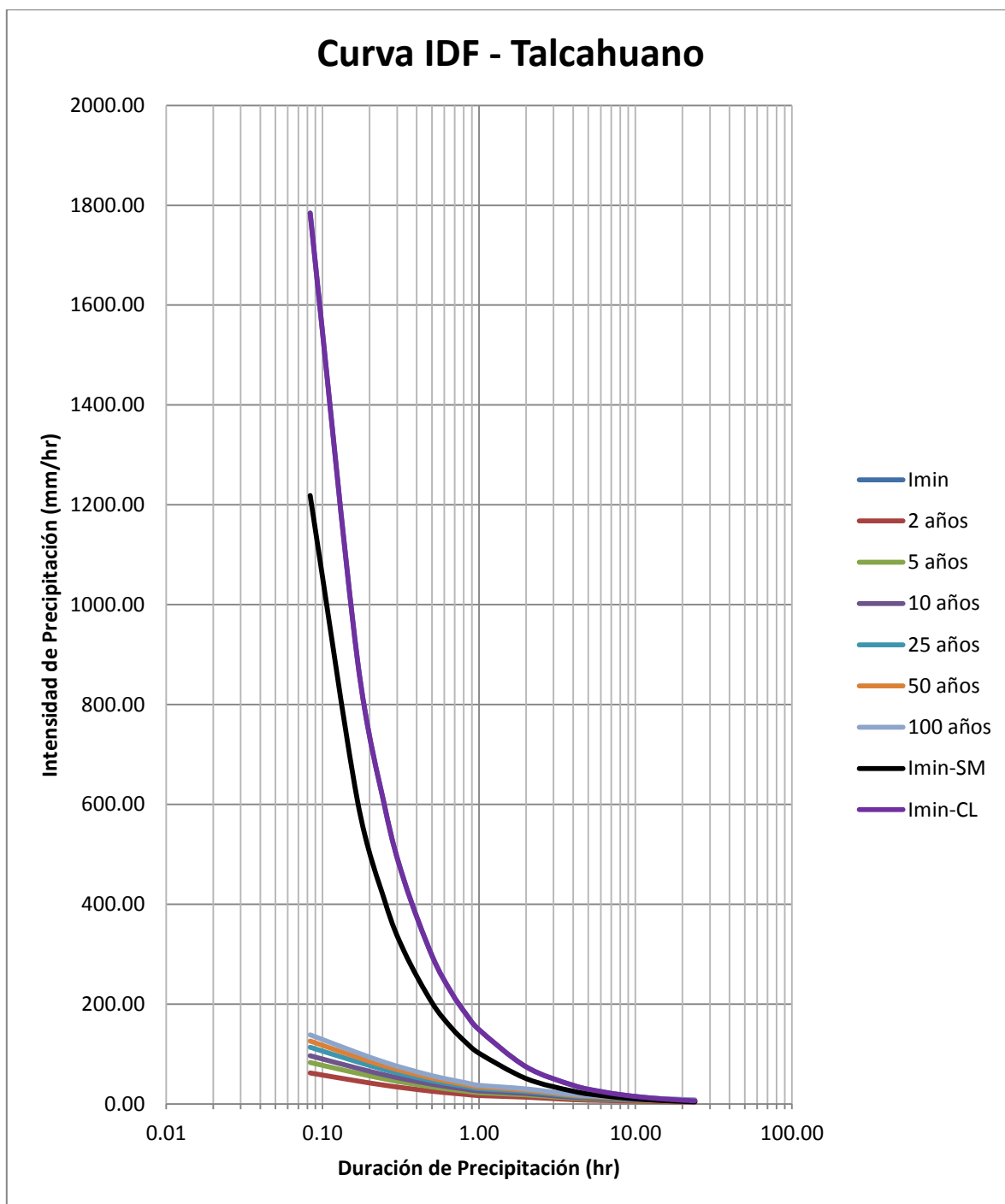


Fig.6.39: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Talcahuano.
 (Fuente: Elaboración Propia)

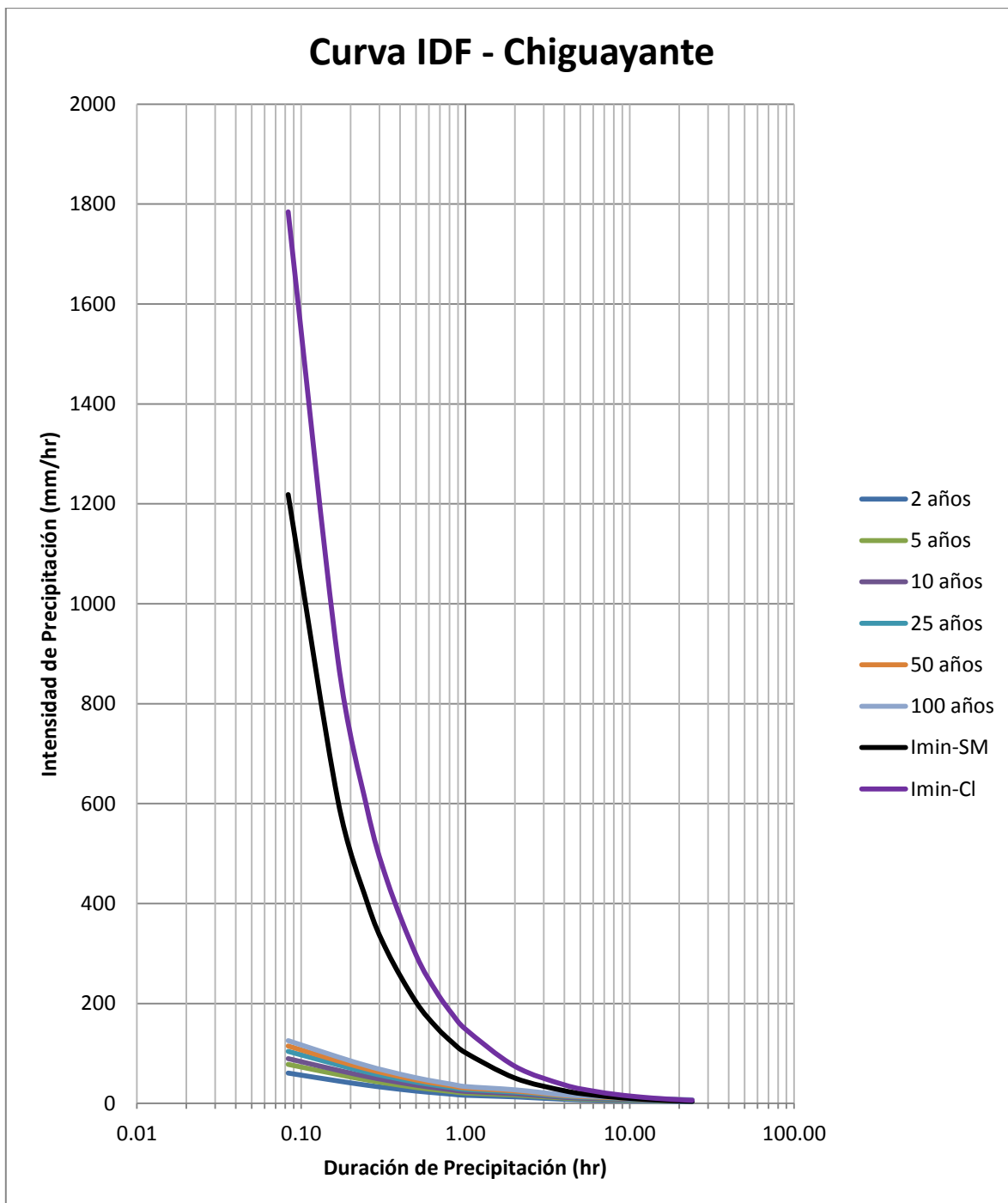


Fig.6.40: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Chiguayante.

(Fuente: Elaboración Propia)

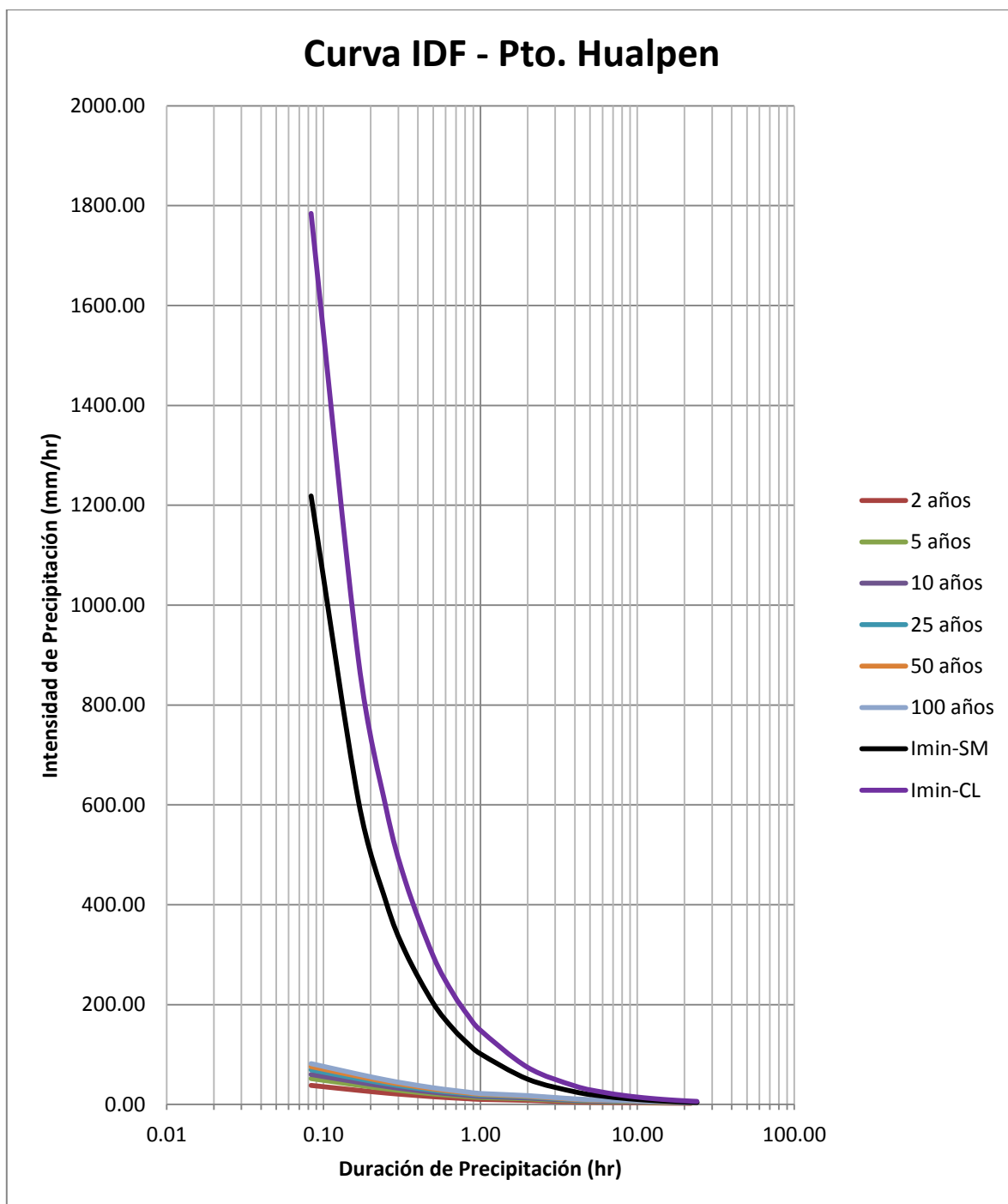


Fig.6.41: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Pto. Hualpén.
 (Fuente: Elaboración Propia)

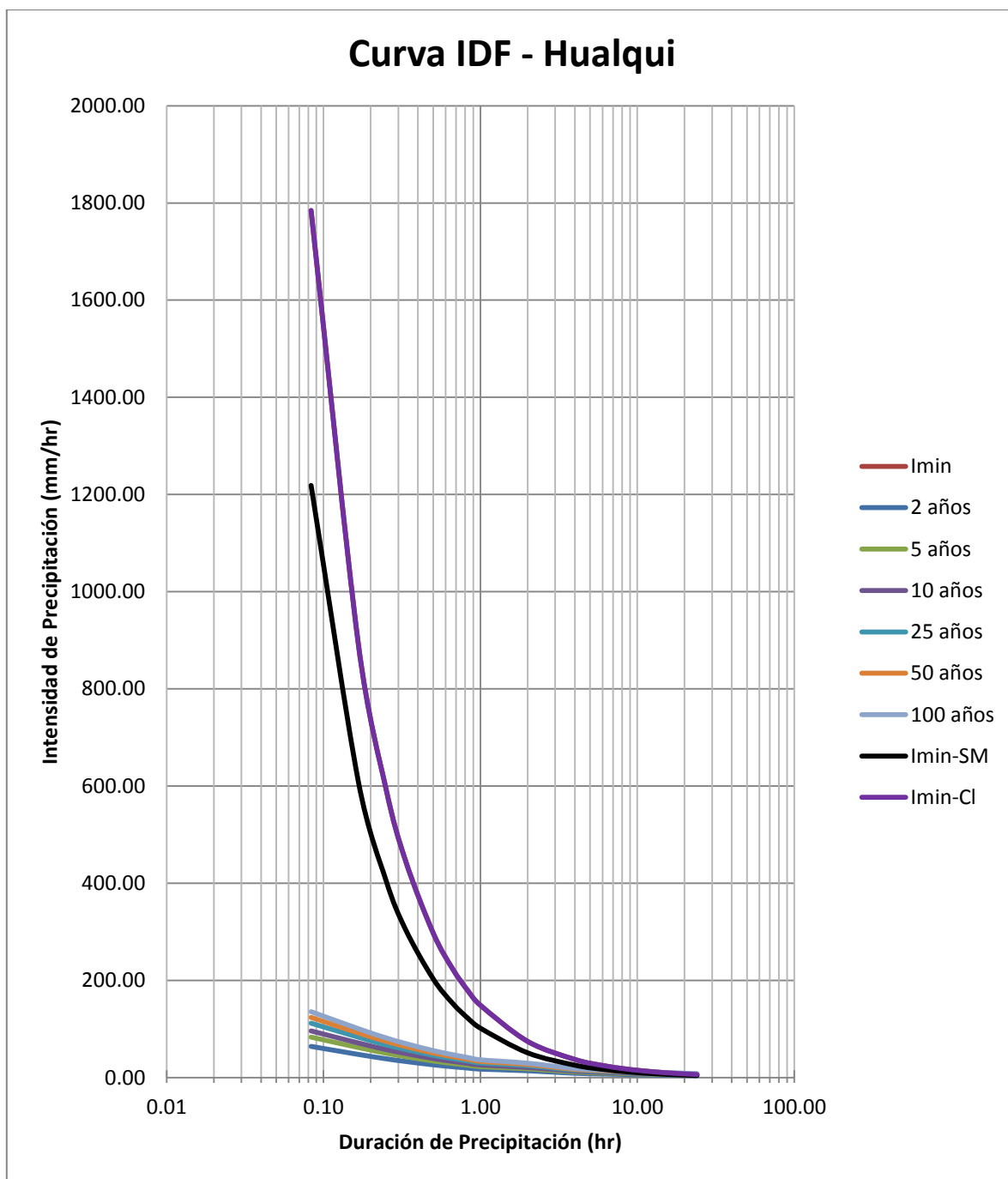


Fig.6.42: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Hualqui.

(Fuente: Elaboración Propia)

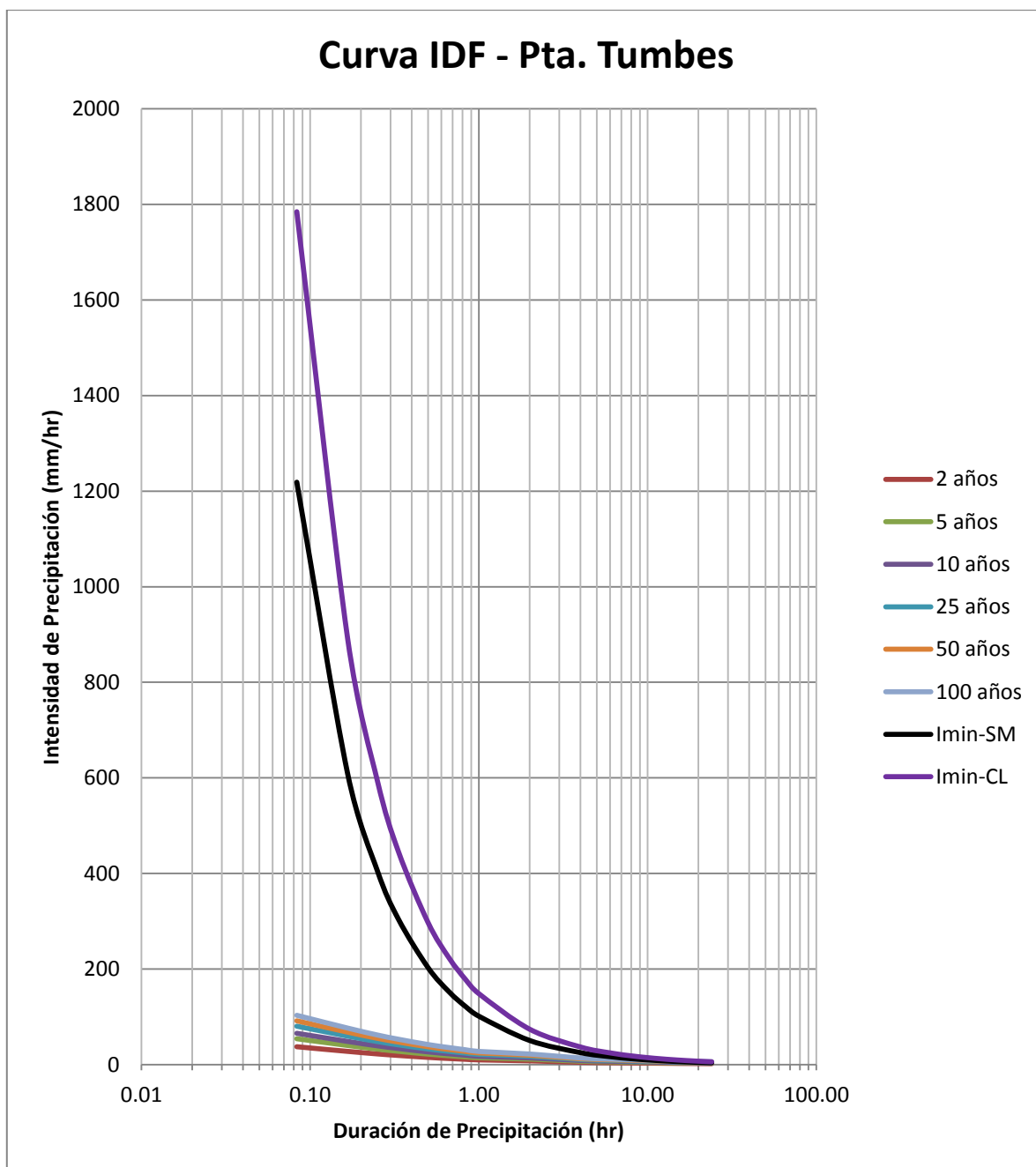


Fig.6.43: Intersección curva IDF v/s curva Intensidades mínimas estación Pta. Tumbes.
 (Fuente: Elaboración Propia)

6.6.- Umbrales de precipitación por ruta vial.

6.6.1.- Ruta de la Madera CH-156

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	8	12.31	98.48
50	9	10.71	96.39
25	12	8.07	96.84
10	15	6.50	97.50
5	19	5.04	95.76
2	23	3.37	77.51

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	15	9.43	141.45
50	17	8.12	138.04
25	21	6.31	132.51
10	23	5.24	120.52
5			
2			

Fig.6.44: Intensidades mínimas Estación Cerro caracol para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	8	12.65	101.20
50	9	11.01	99.09
25	12	8.70	104.40
10	16	6.49	103.84
5	19	5.28	100.32
2	23	3.67	84.41

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	15	9.49	142.35
50	18	8.05	144.90
25	21	6.60	138.60
10	24	5.29	126.96
5			
2			

Fig.6.45: Intensidades mínimas Estación Chiguayante para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	14.66	102.62
50	8	12.45	99.60
25	10	10.16	101.60
10	14	7.54	105.56
5	19	5.60	106.40
2	24	3.78	90.72

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	14	10.65	149.10
50	16	8.95	143.20
25	19	7.54	143.26
10	21	6.01	126.21
5			
2			

Fig.6.46: Intensidades mínimas Estación Hualqui para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

- Umbral de precipitación para Arena – Limosa (SM): 101.96 mm
- Umbral de precipitación para Arcilla de baja plasticidad (CL): 141.49 mm

6.6.2.- Ruta del Itata CH-152

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	13.94	97.58
50	8	11.95	95.60
25	10	9.46	94.60
10	13	7.37	95.81
5	17	5.68	96.56
2	23	3.66	84.18

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	13	10.65	138.45
50	15	9.15	137.25
25	18	7.31	131.58
10	21	5.93	124.53
5	23	4.80	110.40
2			

Fig.6.47: Intensidades mínimas Estación Carriel Sur. (Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	14.58	102.06
50	9	12.00	108.00
25	11	9.54	104.94
10	14	7.59	106.26
5	17	6.07	103.19
2	21	4.15	87.15

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	13	11.14	144.82
50	16	9.36	149.76
25	19	7.51	142.69
10	22	6.11	134.42
5	24	4.97	119.28
2			

Fig.6.48: Intensidades mínimas Estación Bellavista. (Fuente: Elaboración Propia)

- Umbral de precipitación Arena – Limosa (SM): 100.46 mm
- Umbral de precipitación Arcilla de baja plasticidad (CL): 139.85 mm

6.6.3.- Ruta 150.

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - Zw=0.5 - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	13.94	97.58
50	8	11.95	95.60
25	10	9.46	94.60
10	13	7.37	95.81
5	17	5.68	96.56
2	23	3.66	84.18

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - Zw=0.5 - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	13	10.65	138.45
50	15	9.15	137.25
25	18	7.31	131.58
10	21	5.93	124.53
5	23	4.80	110.40
2			

Fig.6.49: Intensidades mínimas Estación Carriel Sur para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - Zw=0.5 - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	14	6.72	94.08
50	16	5.91	94.56
25	18	4.99	89.82
10	20	4.28	85.60
5	24	3.40	81.60
2			

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - Zw=0.5 - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	20	5.72	114.40
50	22	5.00	110.00
25	24	4.20	100.80
10			
5			
2			

Fig.6.50: Intensidades mínimas Estación Dichato para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - Zw=0.5 SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	13	7.68	99.84
50	15	6.64	99.60
25	18	5.36	96.48
10	21	4.40	92.40
5	24	3.49	83.76
2			

Intensidad Limite para CL - Zw=0.5 (m)			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	20	6.35	127.00
50	22	5.48	120.56
25	24	4.52	108.48
10			
5			
2			

Fig.6.51: Intensidades mínimas Estación Coelemu para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

- Umbral de precipitación Arena – Limosa (SM): 94.81 mm
- Umbral de precipitación Arcilla de baja plasticidad (CL): 125.4 mm

6.6.4.- Pedro de Valdivia-Chiguayante.

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	8	12.31	98.48
50	9	10.71	96.39
25	12	8.07	96.84
10	15	6.50	97.50
5	19	5.04	95.76
2	23	3.37	77.51

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	15	9.43	141.45
50	17	8.12	138.04
25	21	6.31	132.51
10	23	5.24	120.52
5			
2			

Fig.6.52: Intensidades mínimas Estación Cerro caracol para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	8	13.09	104.72
50	9	11.49	103.41
25	11	9.21	101.31
10	14	7.40	103.60
5	17	5.98	101.66
2	21	4.21	88.41

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	15	10.03	150.45
50	17	8.72	148.24
25	20	7.05	141.00
10	22	5.95	130.90
5	24	4.90	117.60
2			

Fig.6.53: Intensidades mínimas Estación Nonguen para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ - SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	8	12.65	101.20
50	9	11.01	99.09
25	12	8.70	104.40
10	16	6.49	103.84
5	19	5.28	100.32
2	23	3.67	84.41

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ - CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	15	9.49	142.35
50	18	8.05	144.90
25	21	6.60	138.60
10	24	5.29	126.96
5			
2			

Fig.6.54: Intensidades mínimas Estación Chiguayante para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

- Umbral de precipitación Arena – Limosa (SM): 100.56 mm
- Umbral de precipitación Arcilla de baja plasticidad (CL): 140.84 mm

6.6.5.- Concepción-Talcahuano.

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	7	14.77	103.39
50	9	12.05	108.45
25	10	10.30	103.00
10	13	7.82	101.66
5	16	5.99	95.84
2	20	4.01	80.20

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	13	11.21	145.73
50	15	9.50	142.50
25	18	7.94	142.92
10	20	6.25	125.00
5	23	5.00	115.00
2			

Fig.6.55: Intensidades mínimas Estación Talcahuano para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	15	6.18	92.70
50	18	5.31	95.58
25	21	4.40	92.40
10	24	3.55	85.20
5			
2			

Fig.6.56: Intensidades mínimas para Estación Pto. Hualpén para suelo tipo Arena-Limosa.

(Fuente: Elaboración Propia)

Intensidad Limite para $\mu=35\%$ - $Z_w=0.5$ SM			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	11	9.01	99.11
50	13	7.45	96.85
25	16	5.83	93.28
10	20	4.26	85.20
5	24	3.21	77.04
2			

Intensidad Limite para $\mu=54\%$ - $Z_w=0.5$ CL			
P.R. (años)	Duración (hr)	Intensidad (mm/hr)	PP (mm)
100	20	6.70	134.00
50	22	5.68	124.96
25	24	4.75	114.00
10			
5			
2			

Fig.6.57: Intensidades mínimas para Estación Pta. Tumbes para ambos suelos.

(Fuente: Elaboración Propia)

- Umbral de precipitación Arena – Limosa (SM): 97.28 mm
- Umbral de precipitación Arcilla de baja plasticidad (CL): 135.85 mm