



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LLENADO Y VACIADO
RÁPIDO EN BORDOS DE PROTECCIÓN DE ÁREAS
URBANAS EXPUESTAS A INUNDACIONES**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

JOSÉ LUIS LEZAMA CAMPOS

TUTOR:

M. I. Norma Patricia López Acosta

Agosto 2010



JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. MARTÍN CÁRDENAS SOTO
Secretario: ING. FRANCISCO A. ARROYO CARRASCO
Vocal: M.I NORMA PATRICIA LÓPEZ ACOSTA
1^{er}. Suplente: ING. LUIS ARTURO TAPIA CRESPO
2^{do}. Suplente: ING. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M. I. Norma Patricia López Acosta

NOMBRE DEL DIRECTOR DE TESIS

ÍNDICE

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE LLENADO Y VACIADO RÁPIDO EN BORDOS DE PROTECCIÓN DE ÁREAS URBANAS EXPUESTAS A INUNDACIONES	
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Planteamiento	2
1.2 Objetivo	2
1.3 Alcance	3
1.4 Organización del trabajo	4
2. ANTECEDENTES SOBRE FLUJO DE AGUA	5
2.1 Conceptos básicos	5
2.1.1 Carga hidráulica	5
2.1.2 Gradiente hidráulico	6
2.1.3 Flujo laminar y turbulento	7
2.1.4 Velocidad de infiltración	7
2.1.5 Ley de Darcy	8
2.1.6 Conductividad hidráulica	9
2.2 Análisis de flujo de agua en suelos	10
2.2.1 Flujo de agua establecido	10
2.2.2 Flujo de agua transitorio	13
2.2.2.1 Solución analítica de Alberro	15
2.2.2.2 Solución por el método de elementos finitos	17
3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	21
3.1 Geología	21
3.2 Hidrología	24
3.2.1 Consideraciones generales	24
3.2.2 Causas de inundaciones	26
3.2.3 Un caso particular: la inundación ocurrida en 2007	27
4. CARÁCTERÍSTICAS DE LOS BORDOS DE PROTECCIÓN	30
4.1 Definición	30
4.2 Causas de falla en los bordos	31
4.3 Bordos de protección en la ciudad de Villahermosa	33
4.3.1 Clasificación de los bordos de protección en la ciudad de Villahermosa	34
4.3.2 Datos geométricos	34
4.3.3 Materiales constitutivos de los bordos	36
4.3.4 Características del suelo de cimentación	37
4.3.5 Causas de inestabilidad observadas	37
4.4 Métodos para incrementar la seguridad en los bordos	41

5. MODELACION DEL FLUJO TRANSITORIO DE AGUA EN BORDOS DE PROTECCIÓN	43
5.1 Análisis del flujo transitorio para un bordo de protección en la margen de los ríos	43
5.1.1 Flujo transitorio durante el vaciado rápido	44
5.1.1.1 Flujo transitorio sin considerar la aportación del agua de lluvia	44
5.1.1.2 Flujo transitorio considerando la aportación del agua de lluvia	49
5.1.1.3 Estudio paramétrico para el vaciado rápido	48
a) Variación de la conductividad hidráulica	51
b) Variación de la velocidad de vaciado	52
c) Variación del ángulo del talud	54
5.1.1.4 Colocación de drenes	56
5.1.2 Flujo transitorio durante el llenado rápido	59
5.1.2.1 Flujo transitorio para sin considerar la aportación del agua de lluvia	59
5.1.2.2 Flujo transitorio para considerando la aportación del agua de lluvia	63
5.1.2.3 Estudio paramétrico para el llenado rápido	64
a) Variación de la conductividad hidráulica	65
b) Variación de la velocidad de llenado	66
c) Variación del ángulo del talud	68
5.1.2.4 Colocación de drenes	70
5.2 Análisis del flujo transitorio para un bordo de protección de áreas urbanas	72
5.2.1 Flujo transitorio por llenado y vaciado rápido	73
5.2.2 Estudio paramétrico variando las velocidades de llenado y vaciado	80
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS	85
ANEXOS	90
Anexo I. Características del programa <i>Dflow</i> V1.2	90
Anexo II. Tablas de datos de estaciones hidrométricas cercanas a la ciudad de Villahermosa durante el periodo Octubre-Noviembre de 2007 y 2008	92
Anexo III. Características estratigráficas de los sitios cercanos a los bordos	97

Relación de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 Esquema del valor de la carga hidráulica en diferentes puntos dentro de un espacio de flujo.

Figura 2.2 Cargas de presión, cargas de elevación y cargas totales para los puntos A y B (Brajás, 2007)

Figura 2.3 Representación de una muestra de suelo dividida en su volumen de vacíos y volumen de sólidos

Figura 2.4 Elemento de una región sujeta a flujo tridimensional (Juárez, 1972).

Figura 2.5 Esquema de una red de flujo

Figura 2.6 Representación esquemática del fenómeno de llenado rápido (López-Acosta et. al. 2010).

Figura 2.7 Representación esquemática del fenómeno de vaciado rápido (López-Acosta et. al. 2010).

Figura 2.8 Notaciones y superficie libre de escurrimiento para el vaciado rápido en la cercanía del talud (Alberro et al., 2001)

Figura 2.9 Notaciones y superficie libre para el llenado rápido en la cercanía del talud (Alberro et al., 2002)

Figura 2.10 Red de flujo en un medio homogéneo e isótropo obtenida con el método de elemento finito (López & Auvinet, 1998)

Figura 2.11 Red de flujo en un medio estratificado obtenida con el método de elemento finito (López & Auvinet, 1998)

Figura 2.12 Tipos de análisis de flujo transitorio con el algoritmo Plaxflow. (López-Acosta y Auvinet, 2010)

Capítulo 3

Figura 3.1 Ubicación del estado de Tabasco

Figura 3.2 Fisiografía de Tabasco

Figura 3.3 Geología de Tabasco (INEGI, 2008)

Figura 3.4 Caracterización geológica de la ciudad de Villahermosa (Espinosa, 1976)

Figura 3.4 Regiones hidrológicas de estado de Tabasco

Figura 3.5 Principales ríos cercanos a la ciudad de Villahermosa

Figura 3.6 Zona urbana de Villahermosa con curvas de nivel (IMTA Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco, 2008)

Figura 3.7 Zonas inundadas durante el 2007 (CONAGUA, 2010)

Capítulo 4

Figura 4.1 Componentes de un bordo de protección

Figura 4.2 Efecto de la erosión en un bordo de protección.

Figura 4.3 Efecto del flujo de agua sobre la corona de un bordo de protección.

Figura 4.4 Inestabilidad de los bordos por falla al esfuerzo cortante.

Figura 4.5 Inestabilidad de los bordos causados por asentamientos.

Figura 4.6 Inestabilidad de los bordos causados por tubificación.

Figura 4.7 Tipos de bordos de protección

Figura 4.8. Sección Tipo 1 (Auvinet et. al. 2008).

Figura 4.9. Sección Tipo 2 (Auvinet et. al. 2008).

Figura 4.10. Sección Tipo 1 (Auvinet et. al. 2008).

Figura 4.11. Sección Tipo 2 (Auvinet et. al. 2008).

Figura 4.12 inestabilidad favorecida por erosión fluvial

Figura 4.13 Falla de talud favorecida por cortante, favorecida por el peso del bordo.

Figura 4.14 Falla de talud favorecida por sobrecarga del bordo, erosión al pie y condición de vaciado rápido en suelo medianamente blando.

Figura 4.15 Erosión fluvial

Figura 4.16 Hundimiento visto desde la corona del bordo de defensa

Figura 4.17 Erosión en el bordo de defensa

Figura 4.18 Métodos para incrementar la seguridad de taludes de bordos

Capítulo 5

Figura 5.1 Geometría del bordo de protección en la margen de los ríos en condiciones simplificadas.

Figura 5.2 Condiciones de frontera consideradas para el vaciado rápido.

Figura 5.3 Variación del grado de saturación del bordo y líneas de desaturación para distintas etapas del vaciado rápido.

Figura 5.4 Variación de la línea de desaturación obtenida con la solución analítica de Alberro para diferentes tiempos durante el vaciado rápido.

Figura 5.5 Variación de la línea de desaturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaxflow*) para diferentes tiempos durante el vaciado rápido.

Figura 5.6 Variación de la carga hidráulica para diferentes tiempos durante el vaciado.

Figura 5.7 Variación de la magnitud de la velocidad de flujo para diferentes tiempos de vaciado

Figura 5.8 Incremento del valor de la velocidad máxima de flujo que se presenta cerca a la cara del talud.

Figura 5.9 Variación de la velocidad horizontal V_x respecto a la altura en diferentes secciones del bordo

Figura 5.10 Vectores de velocidad para distintos instantes durante el vaciado rápido

Figura 5.11 Variación del grado de saturación cuando se considera la aportación del agua de lluvia

Figura 5.12 Gastos de salida en la cara del talud para el vaciado rápido.

Figura 5.13 Comparación de los vectores de velocidad obtenidos del análisis que toma en cuenta el agua de lluvia y el análisis que no toma en cuenta la aportación del agua de lluvia.

Figura 5.14 Variación de la línea de desaturación obtenida con la solución analítica de Alberro para diferentes conductividades hidráulicas al final del vaciado rápido.

Figura 5.15 Variación de la línea de desaturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaflow*) para diferentes conductividades hidráulicas al final del vaciado rápido.

Figura 5.16 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas conductividades hidráulicas.

Figura 5.17 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintas conductividades hidráulicas.

Figura 5.18 Variación de la línea de desaturación obtenida con la solución analítica de Alberro para diferentes velocidades de abatimiento al final del vaciado rápido.

Figura 5.19 Variación de la línea de desaturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaflow*) para diferentes velocidades de abatimiento al final del vaciado rápido.

Figura 5.20 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas velocidades de vaciado.

Figura 5.21 Variación del gradiente hidráulico máximo para las distintas velocidades de vaciado.

Figura 5.22 Variación de la línea de saturación obtenida con la solución numérica y la solución analítica de para diferentes ángulos del talud al final del vaciado rápido.

Figura 5.23 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintos ángulos del talud durante el vaciado rápido.

Figura 5.24 Variación del gradiente hidráulico máximo para diferentes ángulos de inclinación del talud durante el vaciado rápido.

Figura.5.25 Geometría de los drenes utilizados en el análisis.

Figura.5.26 Gradientes hidráulicos al pie del talud al final de vaciado rápido.

Figura 5.27 Comparativo de los vectores de velocidad para los distintos drenes.

Figura 5.28 Condiciones iniciales y de frontera para el llenado rápido.

Figura 5.29 Variación del grado de saturación (en %) para el inicio y final del llenado rápido

Figura 5.31 Variación de la línea de saturación obtenida con el método analítico de Alberro para diferentes instantes durante el llenado rápido.

Figura 5.32 Variación de la línea de saturación obtenida con el método de elemento finito (*PlaxFlow*) para diferentes instantes durante el llenado rápido.

Figura 5.33 Variación de la magnitud de la velocidad de flujo para diferentes tiempos de llenado.

Figura 5.34 Variación de la magnitud de la velocidad máxima de flujo para diferentes tiempos de llenado.

Figura 5.35 Vectores de velocidad para tres diferentes tiempos de llenado rápido.

Figura 5.36 Variación del grado de saturación cuando se considera la aportación del agua de lluvia

Figura 5.37 Magnitud del gasto de salida en la cara del talud para el llenado rápido.

Figura 5.38 Comparación de los vectores de velocidad obtenidos para el llenado rápido considerando la aportación del agua de lluvia.

Figura 5.39. Variación de la superficie libre obtenida con el método analítico de Alberro para diferentes conductividades hidráulicas al final del llenado rápido.

Figura 5.40. Variación de la superficie libre obtenida con el método de elemento finito (*Plaflow*) para diferentes conductividades hidráulicas al final del llenado rápido.

Figura 5.41 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas conductividades hidráulicas durante el llenado rápido.

Figura 5.42 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintas conductividades hidráulicas durante el llenado rápido.

Figura 5.43 Variación de la línea de saturación obtenida con el método analítico de Alberro para diferentes velocidades de incremento del nivel de agua al final del llenado rápido.

Figura 5.44. Variación de la línea de saturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaxflow*) para diferentes velocidades de incremento del nivel de agua al final del llenado rápido.

Figura 5.45 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas velocidades de llenado.

Figura 5.46 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintas velocidades de llenado.

Figura 5.47 Variación de línea de saturación con la solución numérica y la solución analítica para diferentes ángulos del talud al final del llenado rápido.

Figura 5.48 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas velocidades de llenado.

Figura 5.49 Gradientes hidráulicos en la cara del talud al final del llenado rápido.

Figura 5.50 Comparativo de los vectores de velocidad para los distintos drenes al final del llenado rápido.

Figura 5.51 Geometría simplificada para los bordos de protección

Figura 5.52 Sección de suelo considerada en el análisis.

Figura 5.53 Información de la estación hidrométrica *Gaviotas*, correspondiente al periodo del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2007 (CONAGUA, 2009).

Figura 5.54 Condiciones de frontera consideradas para realizar el análisis.

Figura 5.55 Resultados de la condición inicial de flujo establecido.

Figura 5.56 Grado de saturación (en %) para diferentes tiempos durante el llenado y vaciado rápido.

Figura 5.57 Líneas de saturación durante el llenado.

Figura 5.58 Líneas de saturación durante el vaciado.

Figura 5.59 Gradientes hidráulicos (magnitud resultante) para diferentes tiempos durante el llenado y vaciado rápido.

Figura 60. Vectores de velocidad (magnitud resultante) para diferentes tiempos durante el llenado y vaciado rápido.

Figura 5.61. Variación del gradiente hidráulico respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

Figura 5.62 Variación del gradiente hidráulico respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

Figura 5.63 Variación de la velocidad de flujo respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

Figura 5.64 Variación de la velocidad de flujo respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

Resumen

El presente trabajo estudia el flujo de agua transitorio ocasionado por el vaciado y llenado rápido en bordos de protección. En particular, se analizan los bordos de protección construidos en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, que fueron afectados por las lluvias extraordinarias ocurridas durante los meses de octubre y noviembre de 2007 que provocaron grandes inundaciones. Los bordos que se analizan en este trabajo son los bordos ubicados en la margen de los ríos, y los bordos de defensa construidos para proteger áreas urbanas expuestas a inundaciones.

En los análisis se utilizan el método analítico propuesto por J. Alberro (2007 y 2008) y el método de elementos finitos. Para los bordos en la margen de los ríos se realizaron estudios paramétricos modelando el fenómeno de llenado y vaciado rápido por separado. Se consideró las características geométricas del bordo, la conductividad hidráulica y porosidad de sus materiales constitutivos, las condiciones iniciales de flujo, y la velocidad del cambio en el nivel del agua con el fin de conocer su influencia en el comportamiento de la velocidad de flujo de los gradientes hidráulicos generados en el bordo. Para cada caso, se obtienen las líneas de saturación y de desaturación producidas por el ascenso y descenso del nivel de agua. También se estudió como influye la colocación de drenes dentro del cuerpo del bordo sobre los gradientes hidráulicos y las velocidades de flujo.

Se modeló el bordo de defensa para ambos fenómenos (llenado y vaciado rápido), considerando las características estratigráficas del suelo de cimentación. Se estudió el comportamiento de la velocidad de flujo y de los gradientes hidráulicos en diferentes puntos de interés en el cuerpo del bordo. Asimismo, se evaluó el comportamiento del bordo sometido a cambios en la velocidad de llenado y vaciado rápido.

1. Introducción

1.1 Planteamiento

El estado de Tabasco se caracteriza por contar con un complejo sistema hídrico, compuesto de lagos, lagunas, pantanos y ríos que están presentes en toda la entidad, además de ser el estado de la República Mexicana que presenta el mayor índice de precipitación pluvial anual. Estas condiciones combinadas con el relieve predominantemente compuesto de llanuras y planicies, han ocasionado serios problemas de inundaciones debido a los desbordamientos de los ríos y la constante precipitación que prevalece durante gran parte del año.

Para mitigar este problema, la ciudad de Villahermosa cuenta con un sistema de protección para controlar el escurrimiento de los ríos que atraviesan la ciudad. Sin embargo, en los años de 1999 y 2007, las inundaciones de la cuenca del río Grijalva demostraron la vulnerabilidad de las obras que comprenden este sistema.

Se ha observado que en general el problema en las márgenes de los ríos es progresivo: comienza con la *erosión* de las mismas. Posteriormente, con las soluciones adoptadas cuando se trata de proteger las márgenes del ataque erosivo del agua, no se ha tenido cuidado con el peso transmitido por la protección marginal colocada, y éste ha sobrepasado la capacidad admisible del suelo, constituido ya sea por estratos de arcilla muy compresible además de presencia importante de materia orgánica (turba); o bien, por intercalaciones de estratos arcillosos y arenosos de compacidad baja a media (Auvinet *et. al.*, 2008). Cuando se rebasa la capacidad de carga del suelo, los bordos presentan una falla por cortante. Finalmente, esta inestabilidad de las márgenes se ve agravada por la *socavación* del lecho de los ríos.

Un aspecto importante es que se ha observado que con la variación del nivel del agua en los ríos (llenado y vaciado rápido), la inestabilidad de los bordos se agrava.

1.2 Objetivo

El objetivo general de esta investigación es estudiar los fenómenos tanto de vaciado como de llenado rápido en los bordos de protección de la ciudad de Villahermosa y su influencia en el comportamiento de los mismos. Especial atención se pone en las velocidades de flujo y de los gradientes hidráulicos y la influencia que tienen parámetros como el material constitutivo del bordo y del suelo de cimentación, sus características geométricas (altura e inclinación del talud), pero también en el tiempo crítico para el llenado y vaciado de los bordos.

1.3 Alcance

Los alcances de esta tesis son:

- Comparar inicialmente los resultados obtenidos al estudiar la influencia del fenómeno de vaciado y llenado rápido en la estabilidad de los bordos mediante métodos analíticos (Alberro *et al.* 2001 y 2002) y numéricos (*PLAXFLOW*), con base en las características físicas y geométricas de los bordos.
- Estudiar la variación de la magnitud de los gradientes hidráulicos y las velocidades de flujo en el cuerpo del bordo para diferentes tiempos del fenómeno de vaciado y llenado rápido haciendo variar:
 - El material del bordo.
 - La geometría de los bordos, principalmente el ángulo del talud.
 - La velocidad con la que ocurren ambos fenómenos (llenado y vaciado rápido).
 - La posición y cantidad de drenes en el cuerpo del terraplén.
- Definir lineamientos generales para dar mayor seguridad a los bordos que se ven afectados por el flujo transitorio ocasionado por el llenado y vaciado rápido con base en los resultados de los análisis realizados.

1.4 Organización del trabajo

Para el desarrollo del estudio, el trabajo está dividido de la siguiente manera:

- Capítulo 1.- Se da una introducción al problema de las inundaciones en la ciudad de Villahermosa. Asimismo, se plantean los objetivos y alcances de esta tesis.
- Capítulo 2.- Se presentan los fundamentos teóricos para comprender el flujo de agua en suelos y sobre los métodos de solución del problema del flujo transitorio (vaciado y llenado rápido).
- Capítulo 3.- Se presentan las condiciones generales de la geología y la hidrología del estado de Tabasco y de la cuenca del Grijalva, para bosquejar el origen del problema.
- Capítulo 4.- Se proporciona información de los tipos de bordos existentes en la ciudad de Villahermosa y sus principales características físicas y geométricas. Además se discuten con detalle las causas de inestabilidad observadas en los bordos.
- Capítulo 5.- Se realizan análisis paramétricos en los que se estudia la influencia de diversos factores en la estabilidad de los bordos.
- Capítulo 6.- Se dan conclusiones de la realización de este tipo de análisis, y recomendaciones para continuar con el estudio.

2. Antecedentes sobre flujo de agua

2.1 Conceptos básicos

2.1.1 Carga hidráulica

La carga hidráulica se define por medio de la ecuación de Bernoulli (1738), la cual expresa que la carga total h en un punto, es la suma de las cargas de presión (h_p), velocidad (h_v) y elevación (h_z) en dicho punto, esto es:

$$h = h_p + h_v + h_z = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v_i^2}{2g} + z \quad (2.1)$$

Donde:

u = presión

g = aceleración de la gravedad

γ_w = el peso volumétrico

v_i = velocidad de infiltración

z = distancia vertical medida desde un punto al plano de referencia

Debido a que el valor de la velocidad v_i es muy pequeño en medios porosos, la carga de velocidad puede despreciarse en la mayoría de los problemas de flujo de agua en suelos, por tanto, la ecuación (2.1) puede simplificarse de la siguiente manera:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (2.2)$$

El valor de la carga hidráulica es un valor relativo, pues depende directamente del lugar donde se sitúa el sistema de referencia.

Por ejemplo:

Suponiendo que se tiene un espacio de flujo como se muestra en la Figura 2.1, la carga hidráulica para los puntos a, b, c y d será:

$$\begin{array}{llll} h_a = \frac{u_a}{\gamma_w} + z_a & h_b = \frac{u_b}{\gamma_w} + z_b & h_c = \frac{u_c}{\gamma_w} + z_c & h_d = \frac{u_d}{\gamma_w} + z_d \\ h_a = \frac{\gamma_w(5m)}{\gamma_w} + 10m & h_b = \frac{\gamma_w(2m)}{\gamma_w} + 10m & h_c = \frac{\gamma_w(11m)}{\gamma_w} + 4m & h_d = \frac{\gamma_w(8m)}{\gamma_w} + 4m \\ h_a = 15 m & h_b = 12 m & h_c = 15 m & h_d = 12 m \end{array}$$

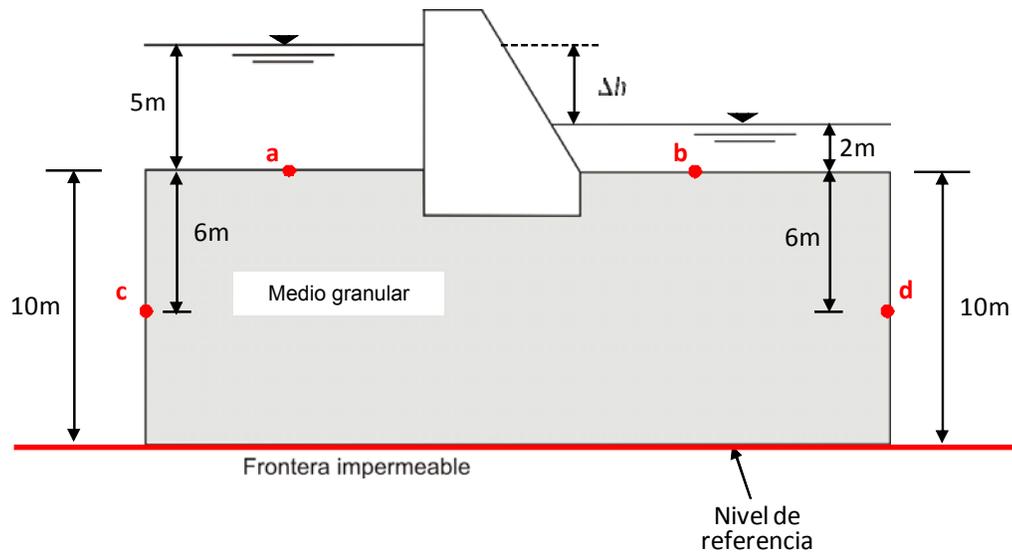


Figura 2.1 Esquema del valor de la carga hidráulica en diferentes puntos dentro de un espacio de flujo.

2.1.2 Gradiente hidráulico

Para que el agua fluya a través del suelo, es necesario que exista una diferencia en la carga hidráulica entre dos puntos dentro del mismo espacio poroso. Esta fluirá del punto de mayor carga hidráulica al punto donde se encuentre menor carga.

Se considera un espacio de flujo como el que se muestra en la Figura 2.2, y se conocen las lecturas *piezométricas* correspondientes de cada uno de los puntos A y B, es posible calcular la diferencia de las cargas hidráulicas Δh entre dichos puntos.

$$\Delta h = h_a - h_b = \left(\frac{u_a}{\gamma_w} + z_a \right) - \left(\frac{u_b}{\gamma_w} + z_b \right) \quad (2.3)$$

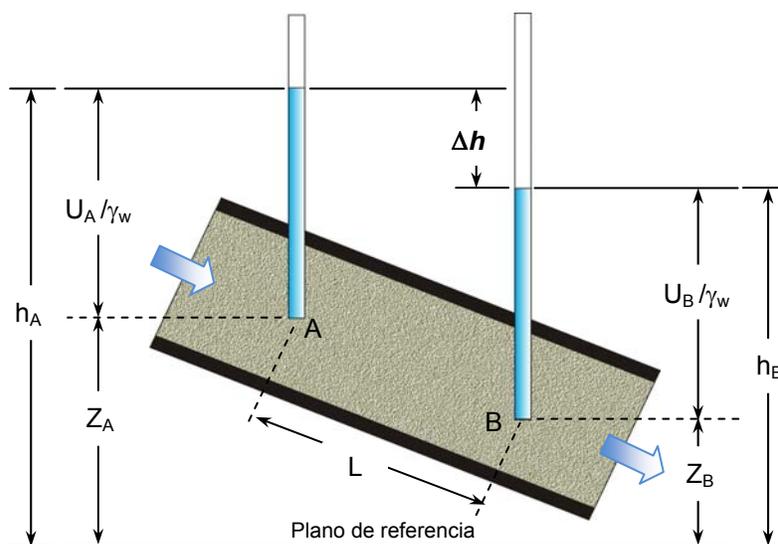


Figura 2.2 Cargas de presión, cargas de elevación y cargas totales para los puntos A y B (Brajas, 2007).

Al dividir la pérdida de carga Δh de la ecuación 2.3 por la longitud L que separa a los puntos A y B, se obtiene:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.4)$$

El valor de i en la ecuación 2.4 es conocido como gradiente hidráulico. Por definición, el gradiente hidráulico es la pérdida de carga hidráulica por unidad de longitud (Juárez, 1972).

2.1.3 Flujo laminar y turbulento

De manera general, la forma en que las partículas de agua pueden moverse de un punto a otro a lo largo de una trayectoria dentro de un suelo, se divide en dos, en laminar y en turbulenta. Se dice que existe flujo laminar cuando las líneas que describen las trayectorias de las partículas de agua (líneas de flujo) al desplazarse por el medio poroso no se juntan, esto es, las partículas permanecen paralelas entre sí al moverse a lo largo de todo el medio. El flujo turbulento se presenta cuando las líneas de flujo dejan de ser paralelas y se cruzan entre si de manera aleatoria.

Se ha comprobado de manera experimental que cuando la velocidad de flujo es relativamente baja, el flujo se comporta de manera laminar. Cuando la velocidad aumenta, el flujo pasa de ser laminar a ser turbulento. Sin embargo, si la velocidad disminuye una vez establecido el flujo turbulento, la velocidad a la que se convierte en flujo laminar no es la misma que tenía en el momento en que el flujo cambio de laminar a turbulento (Flores, 1999). La velocidad específica debajo de la cual el flujo es siempre laminar, es conocida como velocidad crítica.

2.1.4 Velocidad de infiltración

Una medio granular puede mostrarse esquemáticamente dividido en su volumen de sólidos y su volumen de vacíos (Figura 2.3). La velocidad de infiltración V_i , es la velocidad del agua que pasa por la sección del volumen de vacíos o poros de la muestra.

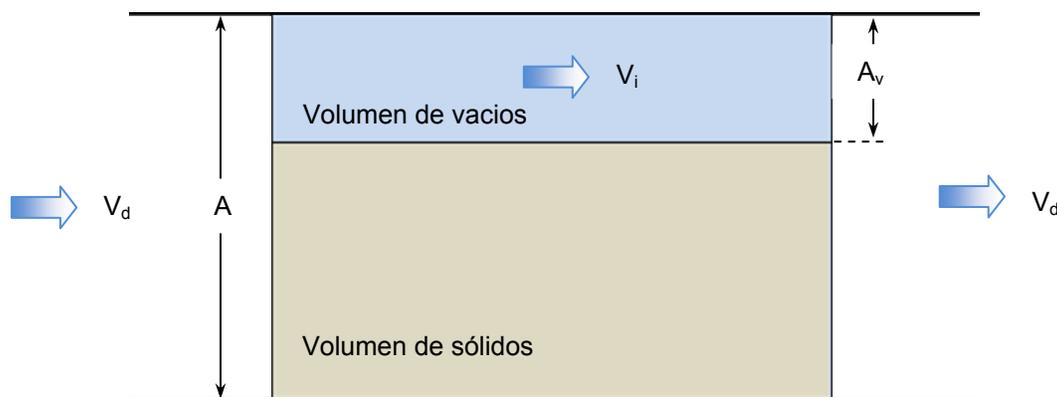


Figura 2.3 Representación de una muestra de suelo dividida en su volumen de vacíos y volumen de sólidos.

Donde:

V_d = velocidad de descarga

V_i = velocidad de infiltración

A = área de la sección de volumen de sólidos

A_v = área de la sección de volumen de vacíos

Se puede escribir la relación entre la velocidad de infiltración y la velocidad de descarga aplicando el principio de continuidad, donde la cantidad de agua que sale por un extremo de la muestra, es el mismo que entra por el otro. Esto es:

$$v_i A_v = v_d A \quad (2.5)$$

Al despejar la velocidad de infiltración en la ecuación 2.5 y sabiendo que el cociente $A/A_v > 1$. Se puede concluir que la velocidad de infiltración o velocidad real es siempre mayor que la velocidad de descarga o de flujo.

$$v_i = v_d \frac{A}{A_v} \quad (2.6)$$

2.1.5 Ley de Darcy

Descubierta de manera experimental por Henry Philibert G. Darcy, en 1856, la ley de Darcy indica que la velocidad del agua que fluye a través de un medio poroso, es proporcional al gradiente hidráulico, esto es:

$$v = -ki \quad (2.7)$$

Donde:

v = velocidad del agua

k = constante de proporcionalidad o conductividad hidráulica

i = gradiente hidráulico

El signo negativo en la última expresión indica que el flujo es en la dirección de la carga hidráulica decreciente, esto es $h_2 - h_1 > 0$.

La ecuación 2.7 es conocida como la Ley de Darcy, sin embargo, la manera más común de expresar la Ley de Darcy es expresándola en términos del gasto q y el área transversal de la muestra de suelo.

$$\frac{Q}{t} = q = vA \quad (2.8)$$

Donde

Q = volumen de agua

t = tiempo en el que se midió el volumen de agua

Sustituyendo 2.7 en 2.8

$$q = -kiA \quad (2.9)$$

La Ley de Darcy relaciona de manera lineal el comportamiento de la velocidad y el gradiente hidráulico, sin embargo, esta relación solo se cumple mientras el flujo se presente de manera laminar (Juárez, 1972). Cuando la velocidad de flujo rebasa el valor crítico, el flujo se convierte en turbulento, y la Ley de Darcy deja de ser válida (p. ej. el flujo en acuíferos Kársticos y/o fracturados).

El valor de la velocidad crítica de un fluido puede calcularse a través del número de Reynolds, que relaciona las fuerzas de inercia y de viscosidad del fluido. El número de Reynolds (Flores, 1999) se define como:

$$R_e = vD \frac{\gamma_w}{\mu} g \quad (2.10)$$

Donde

R_e =número de Reynolds

D =diámetro promedio de las partículas del suelo

v = velocidad de flujo

γ_w =peso volumétrico del fluido

μ =coeficiente de viscosidad

g =aceleración de la gravedad

El valor límite del número de Reynolds para que la velocidad se mantenga debajo de su valor crítico se encuentra entre $1 < R_e < 20$ (Kazda, 1990).

2.1.6 Conductividad hidráulica

La constante de proporcionalidad que relaciona la velocidad del agua que fluye a través de un espacio poroso con el gradiente hidráulico se conoce como conductividad hidráulica. Se define como la velocidad del agua a través del mismo, cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario (Juárez, 1972).

La conductividad hidráulica está estrechamente relacionada con las características físicas del suelo, como son la distribución de los poros y su tamaño, la forma del sistema poroso, su continuidad y el grado de saturación. La permeabilidad de suelos no saturados es menor y crece rápidamente con el grado de saturación (Flores, 1999.). Sin embargo también depende de las características del fluido que pasa a través del suelo. La conductividad hidráulica que sólo depende de las características físicas del suelo, se conoce como conductividad hidráulica absoluta o intrínseca. La conductividad hidráulica absoluta se relaciona con la conductividad hidráulica de la siguiente manera:

$$k_a = \frac{\gamma_w}{\eta} K \quad (2.11)$$

Donde

γ_w =peso volumétrico del fluido

η =coeficiente de viscosidad

k_a =conductividad hidráulica absoluta

K =conductividad hidráulica

En la tabla 2.1 se presentan los intervalos para los valores típicos para diferentes suelos saturados. Los valores para el coeficiente de permeabilidad se determinan a partir de diferentes procedimientos directos e indirectos. Dentro de los procedimientos directos se encuentran la prueba de carga constante, la prueba de carga variable y las pruebas directas en campo. Para los métodos indirectos están los cálculos a partir de distribuciones granulométricas, pruebas de consolidación y la prueba de capilaridad horizontal entre otras.

Tabla 2.1 Valores típicos de conductividad hidráulica (k), para suelos saturados.

Tipo de Material	"k" [m/s]
Grava limpia	$1 - 1 \times 10^{-2}$
Arena gruesa	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-4}$
Arena fina	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$
Arcilla limosa	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-7}$
Arcilla	1×10^{-8}

(Brajas, 2007)

2.2 Análisis de flujo de agua en suelos

Se ha mencionado que se presentará el flujo de agua cuando dentro de un medio poroso exista una diferencia en la carga hidráulica entre dos o más puntos. Sin embargo este flujo puede presentarse en dos formas distintas según su comportamiento. Cuando el flujo no varía en sus características durante el tiempo, se dice que el tipo de flujo es establecido. Por el contrario, cuando las características que rigen el comportamiento del flujo son distintas para diferentes instantes de tiempo, el flujo se considera transitorio. A continuación se hace una distinción más profunda entre el flujo de agua establecido y transitorio, haciendo énfasis en los métodos de solución a problemas de flujo transitorio que son utilizados durante este trabajo.

2.2.1 Flujo de agua establecido o estacionario

Si se considera un elemento diferencial de suelo (también llamado Volumen Unitario de Control), como el que se muestra en la Figura 2.4, es una región de flujo y que tiene como dimensiones d_x , d_y , y d_z ,

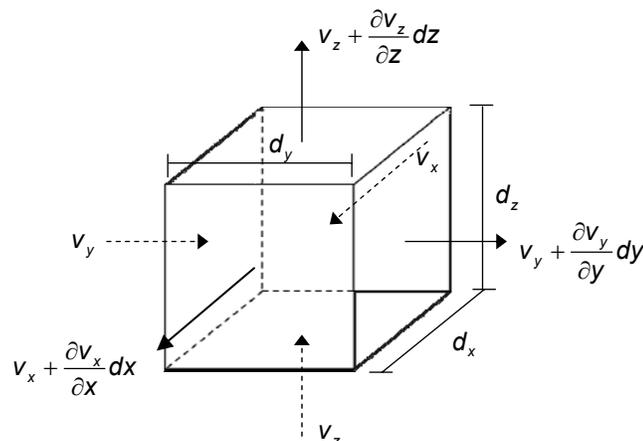


Figura 2.4 Elemento de una región sujeta a flujo tridimensional (Juárez, 1972).

El gasto de entrada en las caras del elemento será igual a:

$$q_E = v_x dydz + v_y dx dz + v_z dy dx \quad (2.12)$$

mientras que el gasto de salida será:

$$q_S = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dydz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dx dz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dy dx \quad (2.13)$$

Por principio de continuidad, la cantidad de agua que entra por el elemento (q_E), tiene que ser igual a la cantidad de agua que sale (q_S) y considerando que el medio tiene sus espacios vacíos saturados y las partículas del suelo se consideran incompresibles la suma de ambos gastos debe ser igual a 0.

$$q_S - q_E = 0 \quad (2.14)$$

Sustituyendo el gasto de entrada y de salida de las ecuaciones 2.12 y 2.13 en la ecuación 2.14, y reduciendo términos es posible expresar que:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

La ecuación 2.15 se le conoce como la Ecuación de Continuidad.

Se debe establecer que esta condición se cumple siempre y cuando

- El régimen del flujo sea establecido
- El suelo esté saturado
- El agua y las partículas sólidas son incompresibles en sí mismas
- El flujo no modifica la estructura del suelo

Al utilizar la definición de gradiente hidráulico en la Ley de Darcy, la velocidad en cada una de las direcciones (x, y, z) queda expresada como:

$$v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Remplazando estos términos en la ecuación de continuidad (ecuación 2.15)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

$$\left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + \left(k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \left(k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.16)$$

Ahora considerando que las conductividades hidráulicas son iguales en todas direcciones por ser un medio isótropo, y que el flujo ocurre sólo en dirección paralela al eje XY

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (2.17)$$

A esta última ecuación se le conoce con el nombre de ecuación de Laplace y es válida para un suelo homogéneo e isótropo. La solución general de la ecuación de Laplace está constituida por dos grupos de funciones que son ortogonales entre sí que tienen la siguiente forma:

$$\Phi = -kh + c$$

$$\Psi(x, y) = cte$$

Donde Ψ y Φ cumple con

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad v_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

$$v_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad v_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

Estás dos funciones satisfacen la ecuación de Laplace de manera tal que

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad y \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = 0$$

Las familias de curvas representan líneas de igual carga hidráulica o líneas equipotenciales (Φ) y líneas de corriente o de flujo (Ψ). A la representación gráfica de ambas familias en una zona de flujo se le llama red de flujo (potenciometría).

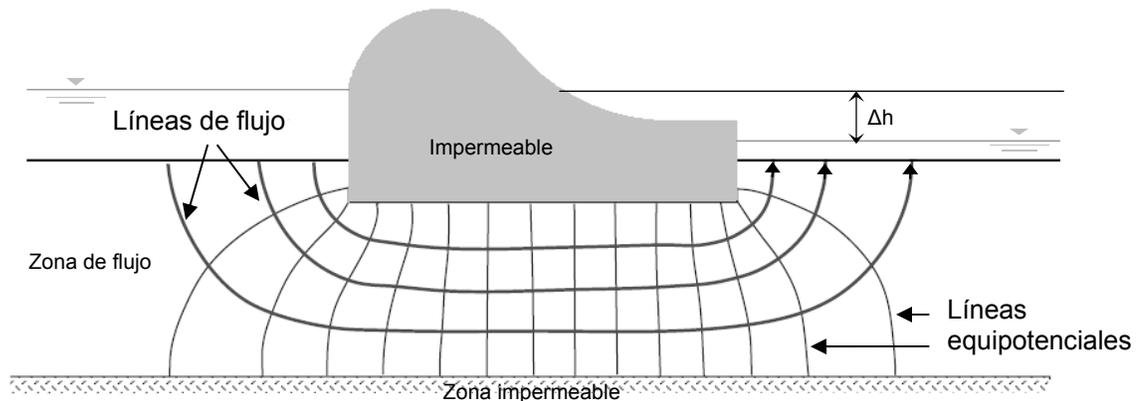


Figura 2.5 Esquema de una red de flujo donde se muestran las líneas de carga hidráulica o equipotenciales y las líneas de corriente o flujo (modificado de Flores, 1999).

La solución de un problema de flujo de agua establecido consiste en resolver la ecuación de Laplace por medio de diversos procedimientos. Dicha solución se puede resolver o aproximar por medio de los siguientes métodos

- Solución analítica de la ecuación de Laplace
- Transformación o mapeo conforme
- Solución gráfica (red de flujo)
- Método de los fragmentos
- Diferencias finitas (método de relajaciones)
- Método de los paseos casuales
- Método de elementos finitos (MEF)
- Método de elementos de frontera (ecuaciones integrales)
- Modelos de laboratorio
- Modelos analógicos

2.2.2 Flujo de agua transitorio

El flujo transitorio en un medio homogéneo e isótropo está regido por la siguiente ecuación (Auvinet y López-Acosta, 2009)

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + c \frac{\partial h}{\partial t} = Q \quad (2.18)$$

Donde

k = conductividad hidráulica del medio

h =carga hidráulica

c =capacidad específica del suelo

Q =el gasto proporcionado a una eventual fuente

t =tiempo

En los medios parcialmente saturados, la capacidad específica depende de la porosidad y del grado de saturación. (Auvinet y López-Acosta, 2009). A su vez, el grado de saturación y la permeabilidad dependen de la presión local (Van Genuchten, 1980).

La solución a problemas de flujo transitorio puede obtenerse a través de los siguientes métodos:

- Solución analítica
- Solución gráfica (redes de flujo transitorias)
- Diferencias finitas
- Método de elementos finitos (MEF)

En este trabajo se utiliza el método analítico propuesto por Jesús Alberro (2001,2002) y el método de elementos finitos a través del algoritmo del programa *PlawFlow* (Delf University of Technology, 2006) para dar solución al problema de flujo transitorio cuando se presentan un abatimiento o un incremento del nivel de agua en la cara de un talud (vaciado y llenado rápido). En las figuras 2.6 y 2.7 se ilustran ambos casos respectivamente.

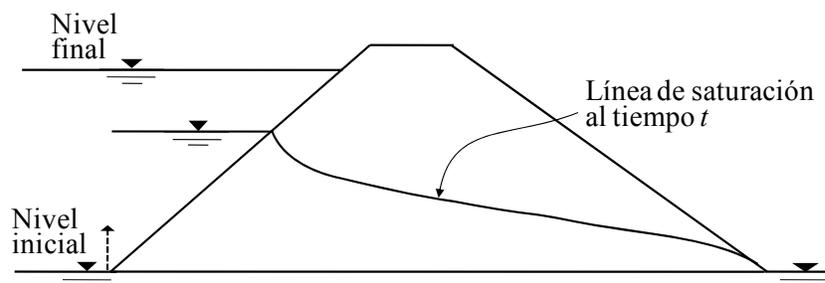


Figura 2.6 Representación esquemática del fenómeno de llenado rápido (López-Acosta *et. al.* 2010).

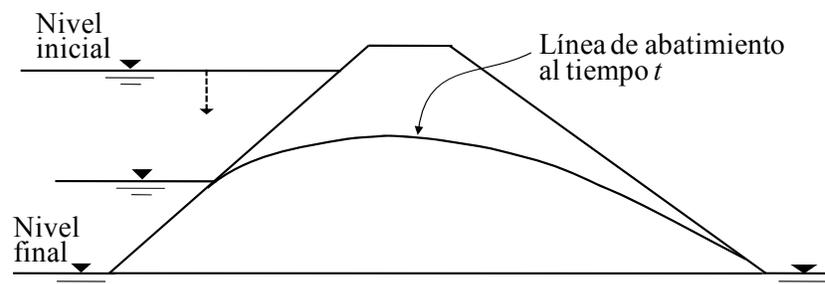


Figura 2.7 Representación esquemática del fenómeno de vaciado rápido (López-Acosta *et. al.* 2010).

2.2.2.1 Solución analítica de Alberro

Con base en la ecuación (2.18) y a las siguientes hipótesis (Poluvarinova, 1962)

- a) es válida la hipótesis de Dupuit (1844) sobre la cuasiverticalidad de las equipotenciales, es decir que las velocidades horizontales no dependen de la ordenada vertical z del punto considerado,
- b) el medio es homogéneo, isótropo e indeformable,

Poluvarinova-Kochina (1962) propone la siguiente ecuación no lineal para calcular la “superficie libre de escurrimiento” o “línea superior de flujo transitorio” en el plano vertical.

$$\frac{\partial^2 H^2(x,t)}{\partial x^2} = 2 \frac{n}{k} \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2.19)$$

Donde

$H(x, t)$ =ordenada de la superficie libre de escurrimiento en el medio

n =porosidad del medio

k = conductividad hidráulica

Sin embargo, las soluciones a la ecuación 2.19 propuestas por Poluvarinova-Kochina para el llenado y vaciado rápido restringen el problema cuando el ángulo de talud es igual a 90° .

Jesús Alberro (2001,2002) a través de diversas herramientas matemáticas, propone las soluciones analíticas para obtener la línea de superficie para el caso donde el ángulo del talud es menor a 90° .

Para la condición de vaciado rápido se considera un nivel freático horizontal máximo inicial H_1 , con una velocidad de descenso a , hasta alcanzar el nivel mínimo H_2 en un tiempo t . El nivel de agua está limitado por un talud de ángulo γ y está constituido por materiales de porosidad n y conductividad hidráulica k con una base impermeable.

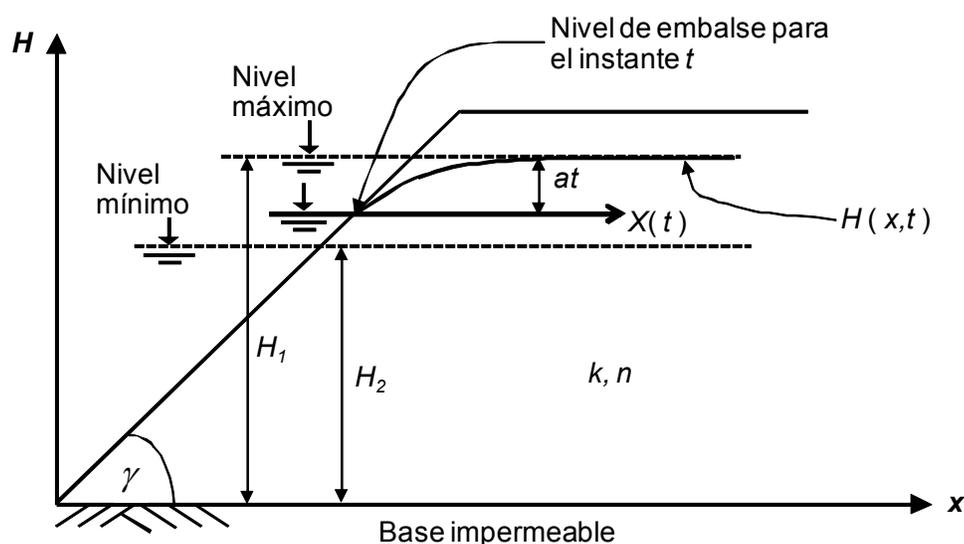


Figura 2.8 Notaciones y superficie libre de escurrimiento para el vaciado rápido en la cercanía del talud (Alberro *et al.*, 2001)

La solución a la ecuación 2.19 para las condiciones anteriores durante un vaciado rápido es:

$$H(x,t) = \left(H_1^2 - \frac{\tan(\gamma)}{\alpha} H_1 F_1(x,t) + a \frac{\tan(\gamma)}{\alpha} \int_0^t F_1(x,t) dt \right)^{1/2} \quad (2.20)$$

Donde

$$F_1(x,t) = \left([\xi - \eta] e^{-\xi^2} \left[e^{-\eta^2} \xi \operatorname{erfc}(\xi) - e^{-\xi^2} \eta \operatorname{erfc}(\eta) \right] \right)$$

Con

$$\xi = \xi(x,t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n}{kH_0 t}} \left[\frac{2at - H_1}{\tan(\gamma)} + x \right] \quad \eta = \eta(x,t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n}{kH_0 t}} \left[x - \frac{H_1}{\tan(\gamma)} \right]$$

La función *erfc* es la función complementaria a la función error o función de Gauss.

$$\operatorname{erfc} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du$$

Tomando en cuenta que

$$0 \leq t \leq \frac{H_1 - H_2}{a} \quad x \geq \frac{H_1 - at}{\tan(\gamma)} \quad \gamma \neq \frac{\pi}{2}$$

Para la condición de llenado rápido se considera una velocidad de ascenso *a*, y una línea superior inicial de flujo parabólica ($t = 0$, Figura 2.9), que alcanza el valor H_3 cuando $x=L$. El nivel de agua aumenta en la cara del talud entre los niveles mínimo H_2 y el máximo H_1 . El talud está constituido con materiales de porosidad *n* y de permeabilidad *k*, con una base impermeable y una pendiente con ángulo γ .

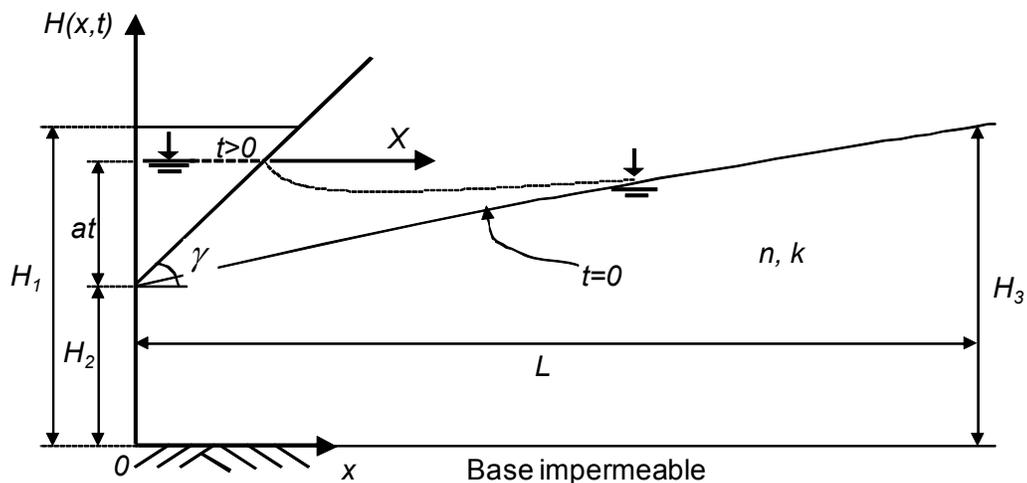


Figura 2.9 Notaciones y superficie libre para el llenado rápido en la cercanía del talud (Alberro *et al.*, 2002)

La solución a la ecuación 2.19 para las condiciones anteriores durante un llenado rápido es

$$H(x,t) = \left(H_2^2 + \frac{H_3^2 - H_2^2}{L} x + \left(H_2 \tan(\gamma) - \frac{H_3^2 - H_2^2}{2L} \right) \frac{1}{\alpha} F_2(x,t) + a \frac{\tan(\gamma)}{\alpha} \int_0^t F_2(x,u) du \right)^{1/2} \quad (21)$$

Donde

$$F_2(x,u) = \left([\xi - \eta] e^{-\xi^2} \left[e^{-\xi^2} \xi \operatorname{erfc}(\xi) - e^{-\eta^2} \eta \operatorname{erfc}(\eta) \right] \right)$$

Con

$$\xi = \xi(x,t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n}{kH_0 t}} (x) \quad \eta = \eta(x,t) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n}{kH_0 t}} \left[x - \frac{2at}{\tan(\gamma)} \right]$$

$$\gamma \neq \frac{\pi}{2}$$

Las ecuaciones 2.20 y 2.21 proporcionan las ordenadas de las “superficies libres” o “líneas de saturación y desaturación” para diferentes tiempos durante el vaciado y llenado rápido. Para el cálculo de estas líneas en este trabajo se implementó el programa *DFlow*, que utiliza el algoritmo propuesto por J. Alberro para la resolver las ecuaciones 20 y 21 para diferentes tiempos y valores de x . Los detalles del programa *DFlow* se presentan en el Anexo I.

2.2.2.2 Solución por el método de elementos finitos

La aplicación del método de elemento finito (*FEM*) en problemas de flujo de agua, se lleva a cabo sustituyendo el medio analizado por elementos finitos triangulares que se adaptan a su geometría; y en los cuales, se acepta como aproximación que la carga hidráulica varía linealmente (López-Acosta, 2010). Asimismo, la carga hidráulica de cada elemento es función del potencial en cada uno de los tres nodos o vértices del triángulo y de sus respectivas coordenadas, así como del área del elemento. La resolución de la ecuación de Laplace en el dominio analizado se sustituye por la obtención del mínimo de una funcional que está precisamente expresada en términos de la expresión aproximada de h para este mismo dominio. Con estas bases se establece el siguiente sistema matricial de ecuaciones (López-Acosta y Auvinet, 1998):

$$[S]\{h\} = 0 \quad (2.22)$$

La resolución del sistema anterior (p. ej. con eliminación gaussiana) proporciona los potenciales h en cada nodo de los elementos finitos de la malla empleada. Las líneas de contorno dibujadas con estos valores, representan las líneas equipotenciales de una red de flujo. Calculados los potenciales h , es posible determinar a partir de ellos, los gradientes hidráulicos; y con éstos a su vez, los gastos y las velocidades de flujo de acuerdo con la ley de Darcy.

Con un procedimiento similar al anterior es posible establecer el sistema de ecuaciones:

$$[S]\{\psi\} = 0 \quad (2.23)$$

Cuya solución proporciona en este caso, los valores nodales de la función de corriente (ψ). De manera análoga, las líneas dibujadas con estos valores representan las líneas de flujo de una red de flujo. Con las dos familias de líneas anteriores, y mediante un algoritmo de interpolación se puede trazar la red de flujo correspondiente (Christian, 1980; López & Auvinet, 1998). Ejemplos de redes de flujo dibujadas con la metodología anterior, se ilustran en las Figuras 2.10 y 2.11. El desarrollo matemático del *FEM* para la solución de problemas de flujo establecido de agua 2D utilizando un enfoque variacional se puede consultar en López y Auvinet (1998).

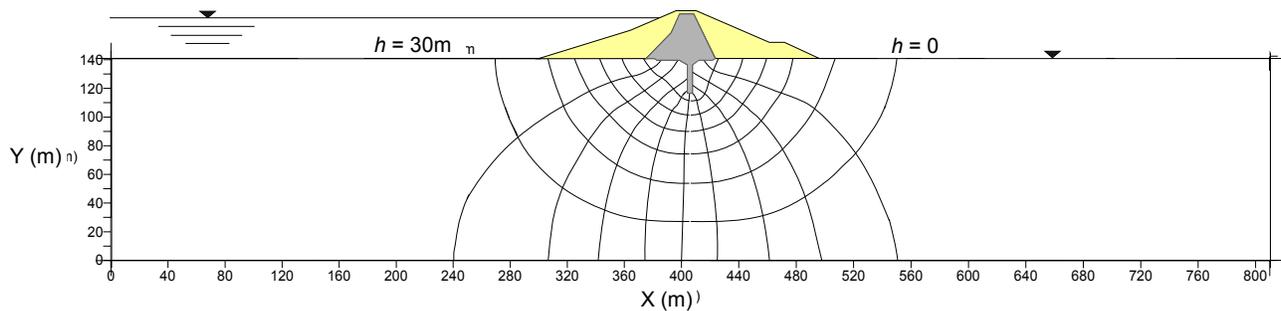


Figura 2.10 Red de flujo en un medio homogéneo e isótropo obtenida con el método de elemento finito (López & Auvinet, 1998)

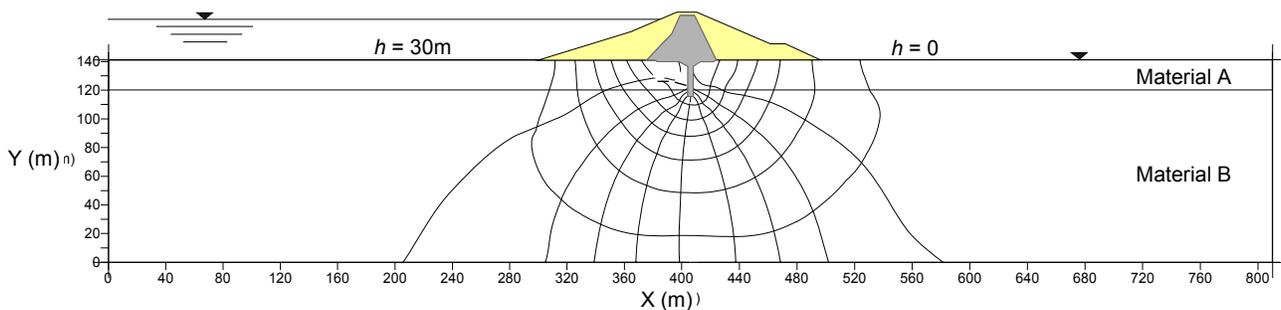


Figura 2.11 Red de flujo en un medio estratificado obtenida con el método de elemento finito (López & Auvinet, 1998)

Plaxflow es un programa de elemento finito de uso comercial desarrollado por Delft University of Technology (2006) que permite realizar análisis de flujo de agua en dos dimensiones.

Para realizar los cálculos correspondientes el programa sigue la siguiente metodología:

1. Definir el dominio de estudio
2. Definir propiedades de los materiales (conductividad hidráulica k y relación de vacíos e) y asignarlas al dominio de estudio.
3. Generar malla de elementos finitos (refinando zonas de interés).
4. Establecer condiciones de frontera
5. Realizar análisis.
6. Ver resultados para el tiempo deseado.

Al establecer las condiciones de frontera en el caso de problemas de flujo transitorio el programa permite realizar análisis de dos formas (Figura 2.12):

—Mediante etapas o fases (*step-wise conditions*), en las que cada una está definida por condiciones de frontera constantes, es decir, en cada fase se considera un determinado nivel del embalse correspondiente a cierto tiempo.

—Considerando explícitamente la variación continua en función del tiempo de los niveles de agua (*time-dependent conditions*), la cual puede seguir funciones lineales, armónicas o los datos particulares de variación de niveles introducidos mediante tablas.

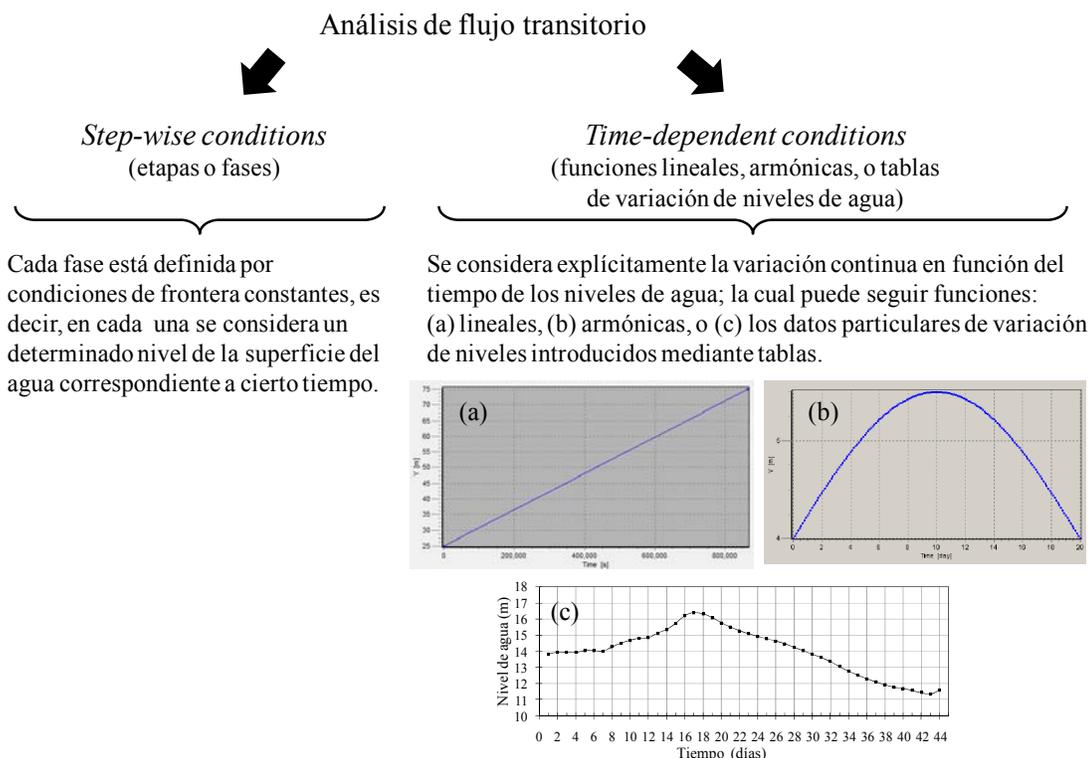


Figura 2.12 Tipos de análisis de flujo transitorio con el algoritmo *Plaxflow*. (López-Acosta y Auvinet, 2010)

Al finalizar los cálculos el programa proporciona:

- El campo de carga hidráulica en cualquier instante en forma numérica (valores en puntos discretos del medio) o mediante curvas de isovalores (equipotenciales).
- El campo de velocidades de flujo, en forma numérica, con representación vectorial o mediante curvas de isovalores.
- El campo de presión de poro en forma numérica o con curvas de isovalores.
- El campo de grado de saturación en forma numérica o con curvas de isovalores.
- Descarga o gasto (se determina en secciones dibujadas por el usuario solamente en la configuración de velocidades).

Es importante mencionar que cada análisis de flujo transitorio parte de una condición de flujo establecida

Por otra parte, el algoritmo de Plaxflow utiliza diferentes modelos para realizar el cálculo del flujo de agua en suelos no saturados. El modelo utilizado para realizar los análisis en este trabajo fué el propuesto por Van Genuchten (1980) que relaciona la conductividad hidráulica (k_r) en función del grado de saturación de la siguiente manera:

$$k_r = \sqrt{S_e} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad (2.24)$$

$$S_e = \frac{S_r - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (2.25)$$

Donde

λ = es un parámetro del modelo que depende de las características del material

S_e = es el grado de saturación efectivo y depende del grado de saturación máximo y mínimo (ecuación 2.25).

S_r = es el grado de saturación

3. Características geológicas e hidrológicas de la zona de estudio

El estado de Tabasco (Figura 3.1) se localiza en el sureste de la república mexicana ocupando un área aproximada de 25,267 km² que representa el 1.3% de la superficie total del país. Cuenta con una población de 1 989 969 (Censos de Población y Vivienda, 2005) y colinda al norte con el Golfo de México y Campeche; al este con Campeche y la República de Guatemala; al sur con Chiapas; al oeste con Veracruz. Está dividido en 17 municipios incluyendo su capital Villahermosa donde se concentra la mayor parte de la población del estado.



Figura 3.1 Ubicación del estado de Tabasco

3.1 Geología

La evolución geológica de estado de Tabasco es consecuencia del proceso tectónico del Golfo de México y está íntimamente relacionada con la apertura del mismo. Sin embargo las unidades que afloran en el estado pertenecientes al Mesozoico y Cenozoico, y sólo representan las fases más recientes de esta evolución. El relieve predominante de la entidad está constituido principalmente de zonas pantanosas y planicies bajas de origen aluvial originadas durante el cuaternario (INE, 1972), resultado del transporte de materiales terrestres a lo largo de la compleja red de ríos que recorren el estado. Al sur, se levantan las Sierras de Chiapas y Guatemala, producto del evento tectónico conocido como Orogenia Laramide la cual finalizó en el Paleoceno y Eoceno inferior (Amos, 1991).

Los suelos más antiguos del estado pertenecen al Cretácico y se encuentran en la parte sur que es la más alta, en la que también se encuentran representados terrenos del Terciario, mientras que en el resto se encuentran terrazas que datan del Pleistoceno y terrenos fluviales recientes, ambos de origen cuaternario (INE, 1972),.

Fisiográficamente, Tabasco forma parte de las provincias de la *Llanura Costera del Golfo Sur*, y la provincia *Sierras de Chiapas y Guatemala* (INEGI, 2007), como se muestra en la Figura 3.1.

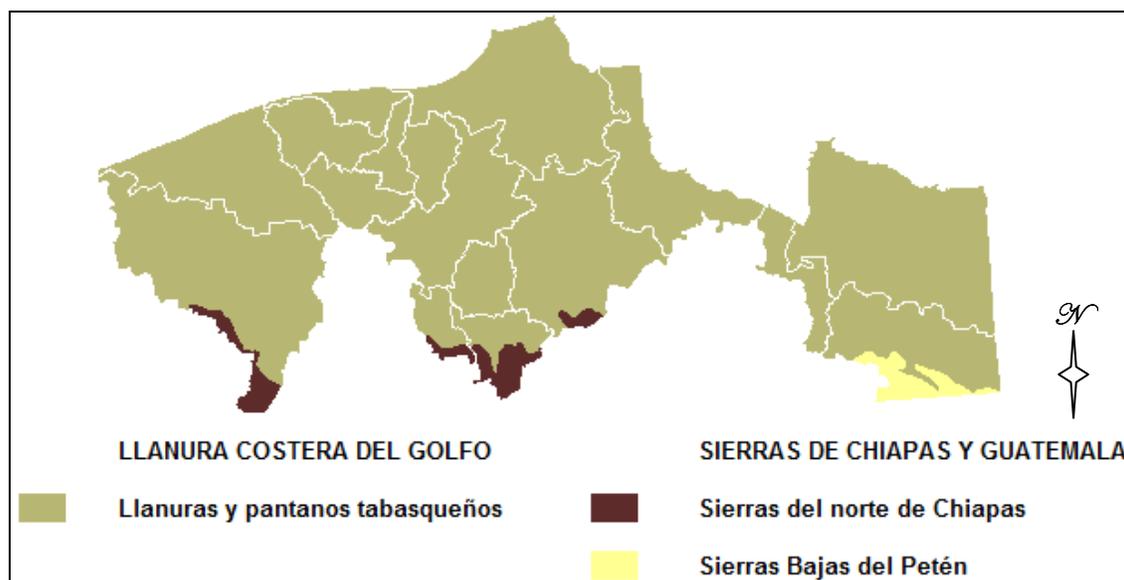


Figura 3.2 Fisiografía de Tabasco

El límite entre ambas provincias está claramente marcado por un cambio de relieve local, manifiesto por un grueso paquete de calizas competentes, plegadas y fracturadas intensamente. La porción serrana está formada por cordones montañosos orientados hacia el noroeste, separados por valles sinclinales, que conservan la misma orientación de las estructuras de plegamiento y dislocación (Servicio Geológico Mexicano, 2004).

En las provincias *Sierras de Chiapas y Guatemala*, afloran las unidades más antiguas del estado (Figura 3.3), constituidas por secuencias de caliza y dolomía que subyacen concordantemente a una secuencia de caliza y lutita del Cretácico Superior de origen marino de plataforma, dispuestos en elementos rocosos con alturas que varían entre los 200 a 500 metros de altitud (SGM, 2004).

La provincia *Llanura Costera del Golfo Sur* abarca los estados de Veracruz, Campeche y Tabasco, comprendiendo a este último casi en su totalidad. Esta llanura está formada por grandes cantidades de aluvión acarreadas por el río Grijalva, el cual atraviesa la provincia para desembocar en la parte sur del Golfo de México. Su superficie está formada por depósitos sedimentarios y se caracteriza por su baja altitud con respecto al nivel del mar, lo que provoca inundaciones, sistemas de lagunas litorales y zonas pantanosas permanentes.

La unidad más antigua de la provincia corresponde a la edad Mioceno, formada por arenas y lutitas, la cual sobreyace concordantemente a otra unidad de arenisca y conglomerado polimíctico de edad Plioceno-Pleistoceno. Los depósitos del Cuaternario que cubren parcialmente a las dos unidades anteriores, son los más extensos en esta llanura (Figura 3.3). Estos sedimentos están constituidos por los siguientes tipos de depósitos: aluviales formados por grava y limo, eólicos constituidos por arenas de cuarzo, de litoral formados por fragmentos de cuarzo y magnetita, en pantanos compuestos por limos y arcillas de color oscuro y lacustre formado por arcilla y limo.



Figura 3.3 Geología de Tabasco (INEGI, 2008)

En el caso particular de la ciudad de Villahermosa, ésta se encuentra ubicada dentro de la llanura Costera del Golfo. En la zona se encuentran dos formaciones (Figura 3.4): una constituida por depósitos clásticos del Terciario (*Tc*), formando lomeríos, y otra por depósitos fluvio-lacustres del Cuaternario (*Qal*). Los depósitos clásticos del Terciario (*Tc*) son de color pardo rojizo y pardo amarillento. Son arcillosos superficialmente y arenosos con gravas redondeadas de 2 a 3 cm de diámetro y ocasionalmente boleas de 10 a 15 cm, a mayor profundidad. Los depósitos fluvio-lacustres (*Qal*) se sedimentaron en el Cuaternario como consecuencia de las inundaciones del río Grijalva. Forman terrenos planos e inundables. En estos depósitos el nivel freático es superficial con variaciones anuales. Estos materiales son de color oscuro, constituidos por capas alternadas de limos arenosos y arcillas que presentan a menudo un alto contenido de materia orgánica (Espinosa, 1976).

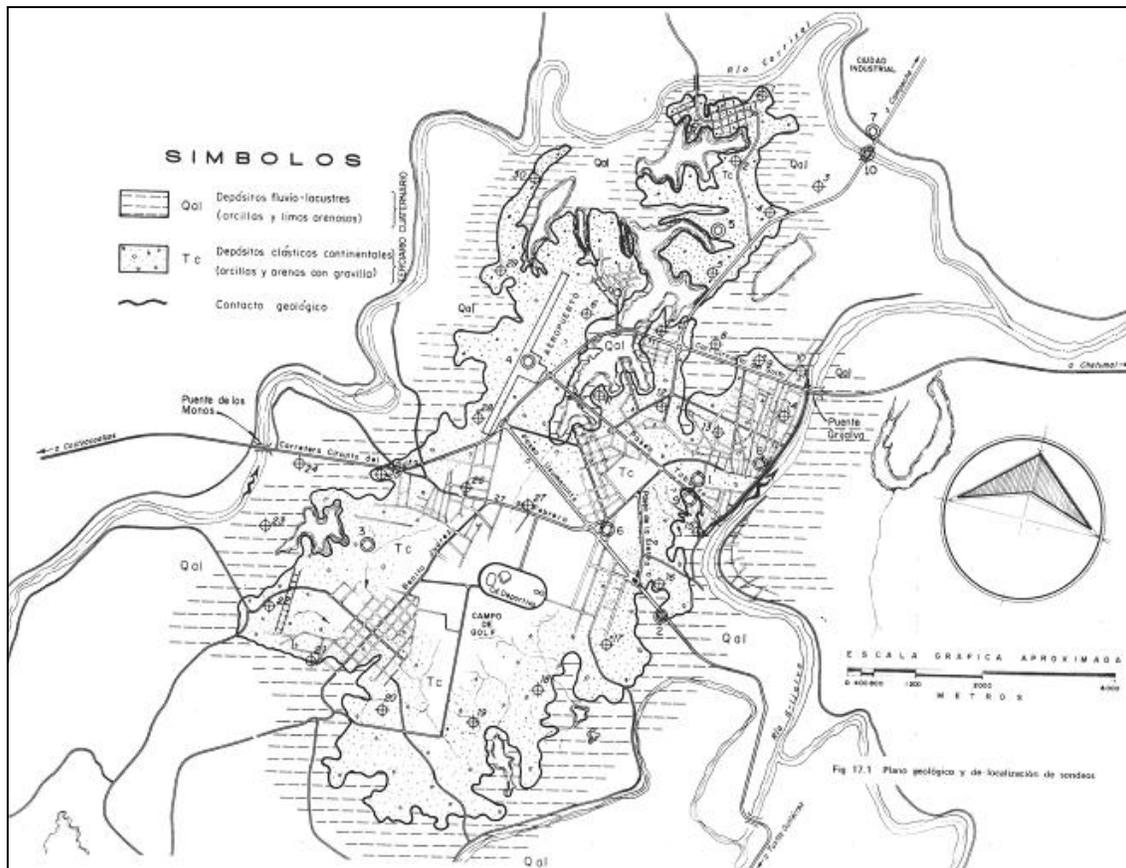


Figura 3.4 Caracterización geológica de la ciudad de Villahermosa (Espinosa, 1976)

3.2 Hidrología

3.2.1 Consideraciones generales

Tabasco es el estado del país donde se localiza la red hidrológica más compleja, así como es la que registra anualmente los mayores volúmenes de precipitación pluvial con aproximadamente 2500 mm de precipitación media anual (CONAGUA, 2009), mientras que sus dos principales cuencas (Grijalva y Usumacinta) aportan cerca del 33% de los recursos hidrológicos del país con un volumen aproximado de 58 900 y 46 300 millones de metros cúbicos medios anuales respectivamente (Barba-Macías, 2006).

En Tabasco se localizan parcialmente las regiones hidrológicas de Coatzacoalcos y Grijalva-Usumacinta (Figura 3.5). La primera está situada en la porción occidental ocupando aproximadamente el 24% de la superficie total del estado, contiene a la cuenca del río Tonalá y el río Coatzacoalcos que se extiende principalmente por los estados de Oaxaca y Veracruz. La segunda región contiene a las cuencas del río Grijalva, río Usumacinta y la laguna de Términos, siendo la cuenca del río Grijalva la más amplia con el 41.45 % de la superficie total (INEGI, 2007).

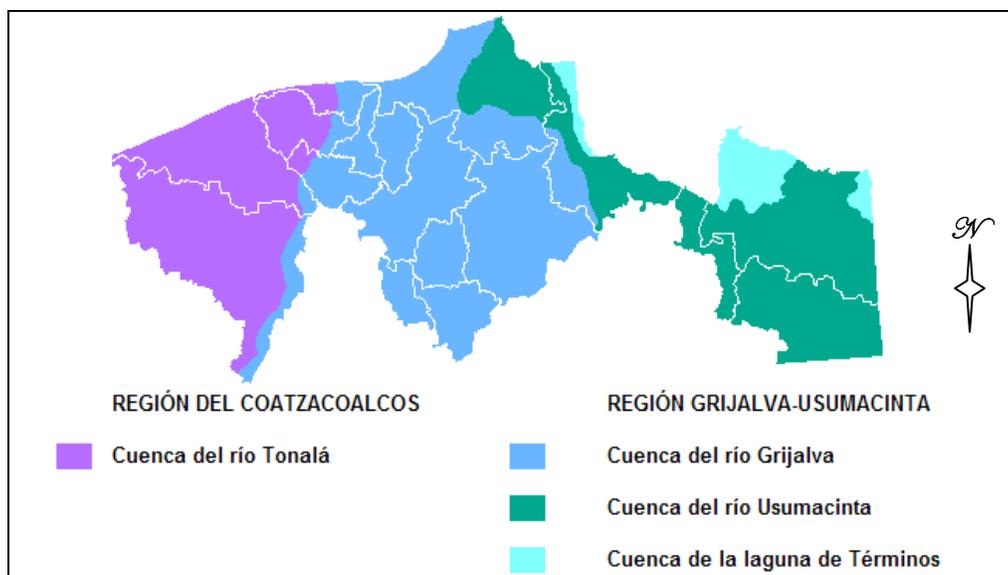


Figura 3.4 Regiones hidrológicas de estado de Tabasco

La red fluvial del estado se compone por un complejo sistema de ríos que corren a lo largo de las llanuras del estado, entre los que destacan los dos ríos más caudalosos del país, el río Grijalva y el río Usumacinta. El río Grijalva nace en la frontera entre México y Guatemala y continua su paso a través de los estados de Chiapas y Tabasco, sobre su recorrido, se encuentran las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas que controlan parcialmente las crecientes del río hacia su desembocadura a las planicies del estado. Después de cruzar la frontera entre Chiapas y Tabasco, el río fluye con dirección Sur-Norte con el nombre de río Mezcalapa recibiendo los aportes de los ríos Platanar y Camoapa, hasta llegar a su división cerca del municipio de Cárdenas, donde se divide en los ríos Samaria y Carrizal. Este último fluye en dirección Oeste-Este, hasta llegar a la ciudad de Villahermosa. En la zona noreste de la ciudad un cauce con un sistema de ríos principalmente provenientes del río de la Sierra, para después retomar el nombre de río Grijalva hasta su desembocadura en el mar, no sin antes recibir aportes de los ríos Usumacinta y Chilapa. A su vez, el río de la Sierra recibe el aporte de los ríos Pichucalco, Tacotalpa y Teapa entre los más importantes.

El río Carrizal tiene como afluente al Medellín, que va de sur a norte, al cual se incorpora el río Samaria y más adelante desemboca en una zona baja, con pantanos, cerca de la costa del Golfo de México. Como la ciudad de Villahermosa se encuentra en una zona casi horizontal, queda circundada por ríos o planicies de inundación (Gracia y Fuente, 2005). Por su parte, el río Usumacinta se forma exclusivamente con los escurrimientos nororientales de la meseta Central de Chiapas con cauces de complicada trayectoria pero que finalmente afluyen a la corriente principal del Usumacinta con una dirección general sureste – noreste (INE, 1978).

Además de ríos, existen diferentes sistemas lagunares temporales y permanentes que cubren gran parte del territorio del estado. Las lagunas interiores suman una extensión total de 72 909.7 ha., de éstas, los lagos permanentes son 483 con una extensión de 54 226.9 ha. y los lagos temporales son 1 665 cuerpos de agua, con una superficie de 18 682.8 ha. (Rodríguez-Rodríguez, 2002).

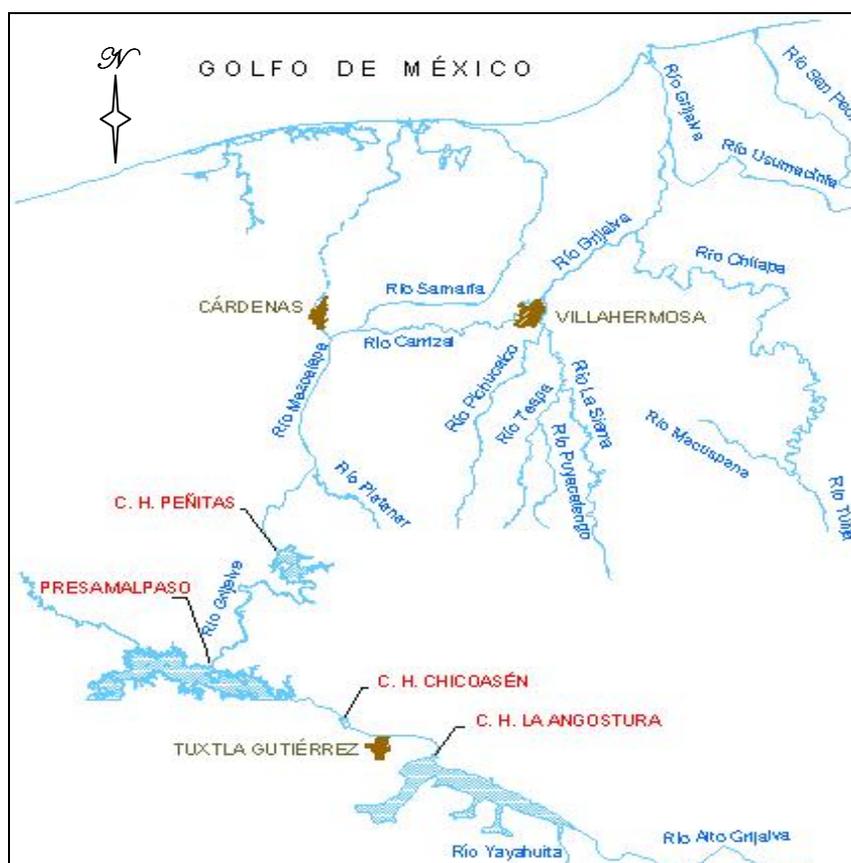


Figura 3.5 Principales ríos cercanos a la ciudad de Villahermosa (Domínguez *et al.*, 2006)

3.2.2 Causas de inundaciones

Desde sus orígenes, el territorio tabasqueño se ha distinguido por sufrir de continuas inundaciones principalmente consecuencia de las características geográficas y climáticas que distinguen a la región, destacando las ocurridas durante los años de 1975, 1990, 1999 y 2007 (Aparicio, 2008). Los daños causados por las inundaciones en los últimos años se han acentuado debido a la expansión y el crecimiento acelerado de la población.

Una de las principales causas por las que la zona de Villahermosa es afectada por inundaciones es debido a su complejo sistema de drenaje, dado que el nivel de agua en los ríos Carrizal, Grijalva y de la Sierra dependen de los gastos aportados por ellos, de tal manera que si uno de ellos viene extraordinariamente crecido, causará una sobreelevación en otro (Gracia y Fuente, 2005). Esta condición es debida a la precipitación diferencial característica de la región que se presenta durante los meses de Agosto y Diciembre, periodo en el cual se presenta en mayor índice de precipitación promedio mensual (INEGI, 2010). En particular, el río de la Sierra puede transportar un escurrimiento importante proveniente de los ríos Tacotalpa y Pichucalco, que son ríos sin control con un área extensa de aportación, lo cual puede contribuir a un mayor remanso en la proximidad de Villahermosa. Otro ejemplo de lo anterior es el río Usumacinta, que al conducir una aportación intensa, puede producir un incremento de los niveles del agua en el tramo final del Grijalva y, en menor escala, en el Chilapa y llega a tener influencia en las descargas de los ríos Carrizal y de la Sierra (Gracia y Fuente, 2005).

Un segundo factor que interviene en la susceptibilidad que tiene la ciudad de Villahermosa a sufrir de inundaciones es la altitud media sobre el nivel del mar que tiene la ciudad y las zonas adyacentes que favorece la acumulación de grandes cantidades de agua y dificulta el drenaje, además de los procesos naturales de erosión, cuyos efectos han sido incrementados por la acción del hombre. En la Figura 3.6 se aprecian zonas altas con altitudes mayores a los 20 msnm (metros sobre el nivel del mar), sin embargo existen zonas de la ciudad por debajo de los 10 msnm que son más susceptibles a inundarse cuando el nivel de los ríos y demás cuerpos de agua sobrepasan su nivel crítico.

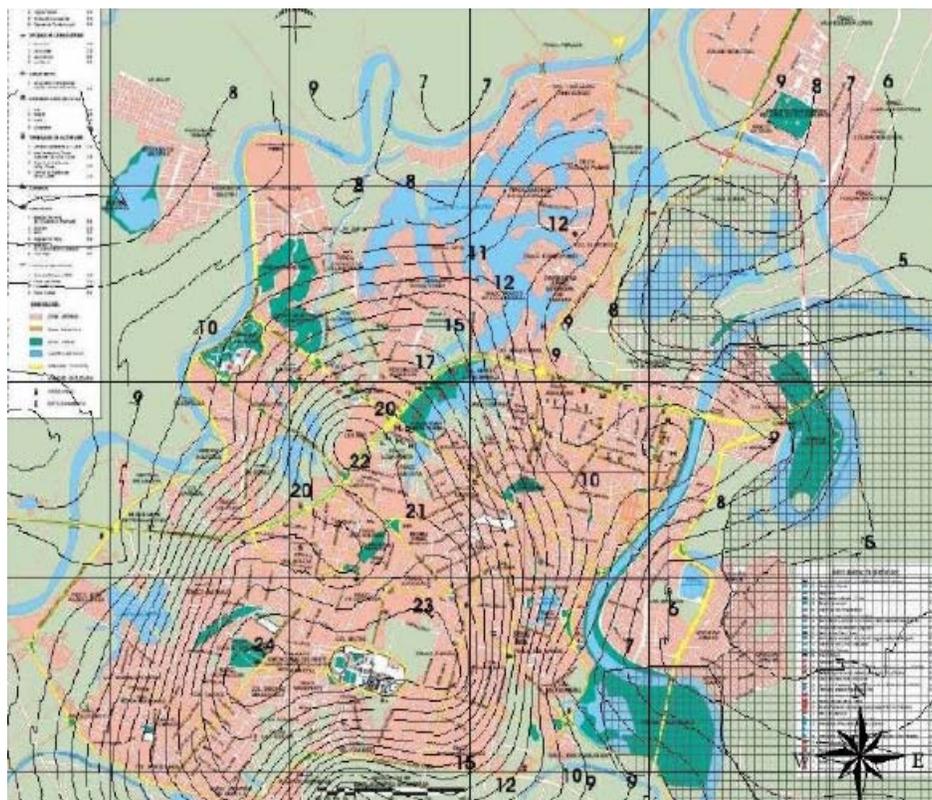


Figura 3.6 Zona urbana de Villahermosa con curvas de nivel (IMTA Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco, 2008)

Finalmente, el sistema de presas que se encuentran en el cauce del río Grijalva (Figura 3.5), pueden generar gastos extraordinarios en los ríos Grijalva y Mezcalapa y en consecuencia en los ríos Samaria y Carrizal, debido a la cantidad de desfogues que son necesarios en las presas durante el periodo de lluvias.

3.2.3 Un caso particular: la Inundación en 2007

Durante el periodo del 28 al 30 de Octubre de 2007 el estado de Tabasco estuvo sujeto bajo precipitaciones extraordinarias que originaron grandes escurrimientos en el sistema de ríos que recorren el estado (Grijalva, Mezcalapa, Carrizal, Samaria, de la Sierra y Usumacinta), provocando grandes inundaciones en gran parte del estado alcanzando tirantes de agua de orden de los 4 metros en algunas zonas. Más de un millón de personas se vieron afectadas por estas inundaciones principalmente en los municipios de Cárdenas y Villahermosa. En la Figura 3.7 se muestran las zonas más afectadas por la inundación y el nivel de afectación que ésta tuvo en todo el estado.

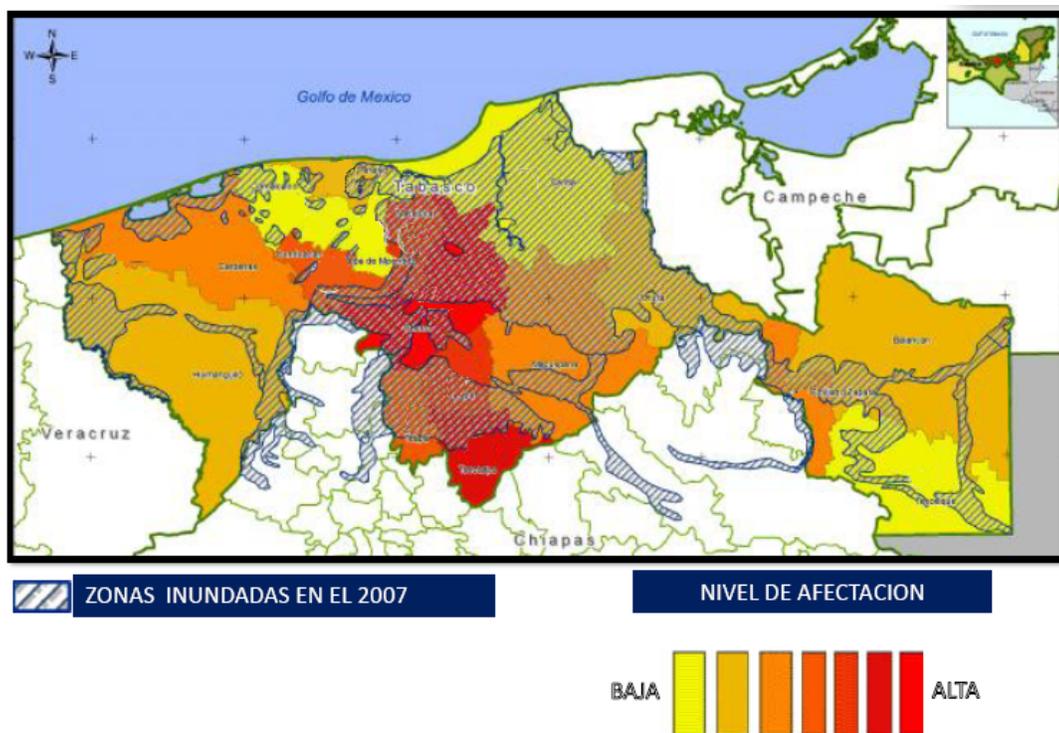


Figura 3.7 Zonas inundadas durante el 2007 (CONAGUA, 2010)

Las principales causas que dieron origen a la inundación pueden dividirse en dos, en inmediatas que se refieren al origen de las crecientes, y a las mediatas, que se refieren a las condiciones que favorecieron la vulnerabilidad de Tabasco frente a dichas crecientes (IMTA, 2008).

Entre las inmediatas se encuentra la presencia de dos frentes fríos (4 y 5) que originaron precipitaciones extraordinarias mayores de 400 mm en 24 horas (Municipio de Ocoatepec) con un periodo de retorno de 25 años (Figura 3.8), y cerca de 1000 mm acumulados en tres días (del 28 al 30 de octubre), en la cuenca media y baja del río Grijalva lo que ocasionó una sobre elevación de los ríos Grijalva, Carrizal y de la Sierra que se encontraban ya en niveles arriba de sus escalas críticas (Nivel de Agua Máximo Ordinario - NAMO) debido a escurrimientos generados por eventos anteriores (11, 12, 23 y 24 de octubre).

Esta situación favoreció las inundaciones en las partes bajas de Villahermosa y las áreas cercanas a los márgenes de los ríos de la Sierra. Por otra parte, los escurrimientos generados por una sucesión de avenidas en la cuenca del la presa Peñitas obligaron a la operación de la obra de excedencias, misma que descargó caudales que alcanzaron los 2 000 m³/s, superiores a los gastos que pueden ser transmitidos por el cauce del río Carrizal a la altura de Villahermosa (IMTA, 2008).

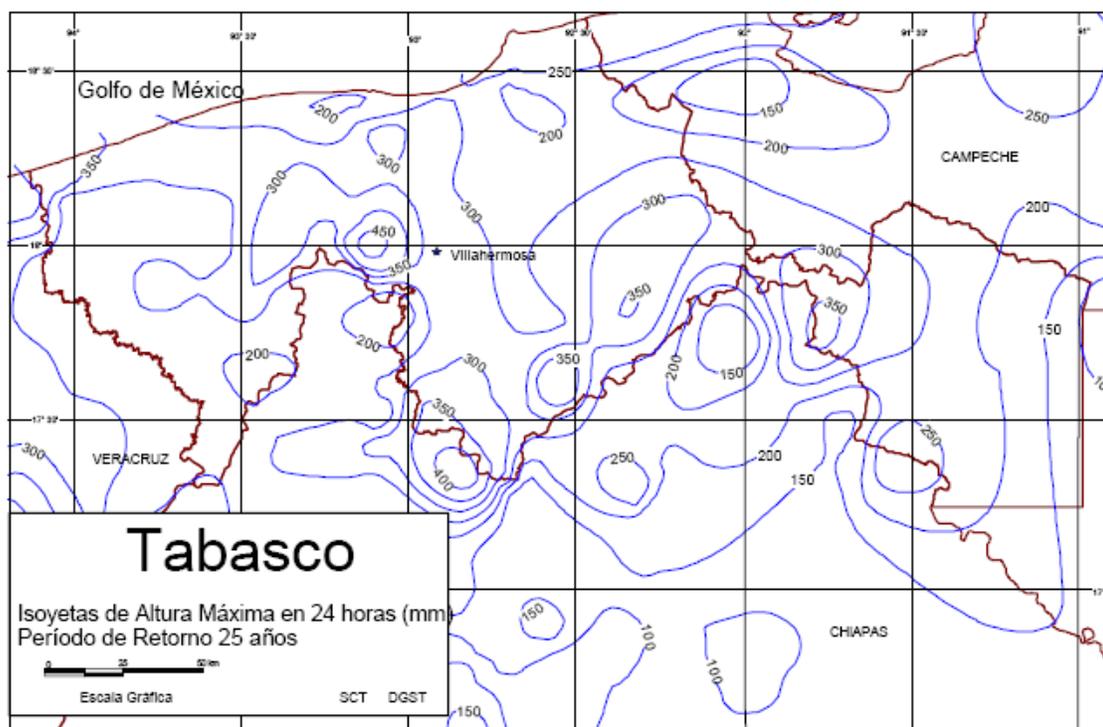


Figura 3.8 Mapa de isoyetas en 24 horas para un periodo de retorno de 25 años (SCT, 2010)

Por otra parte, las causas mediatas se pueden enumerar en las siguientes:

- La vulnerabilidad a las inundaciones debido principalmente a la presencia de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo.
- La falta de infraestructura hidráulica de control en los ríos de la Sierra y Usumacinta.
- La carencia de un mejor sistema de pronóstico y de alertamiento temprano.
- La falta de un plan integral de crecientes.

En lo que sigue, se hace énfasis en las estructuras que protegen las áreas propensas a inundaciones cercanas a la ciudad de Villahermosa, especialmente las estructuras localizadas cerca de los ríos y cuerpos de agua que se vieron afectadas por la inundación ocurrida en 2007, como parte de la solución para mitigar los problemas ocasionados por las inundaciones.

4. Características de los bordos de protección

4.1 Definición

Un bordo o dique es una estructura diseñada para contener, controlar o desviar el flujo de agua a fin de proporcionar protección frente a inundaciones temporales (ASCE, 2009). Generalmente es construido de tierra o suelo compacto con el fin de obtener una estructura rígida. La diferencia principal con respecto a una cortina de tierra consiste en que el bordo usualmente sólo retiene el agua durante un tiempo reducido, que puede durar algunos días o pocas semanas (Maza y Franco, 1997).

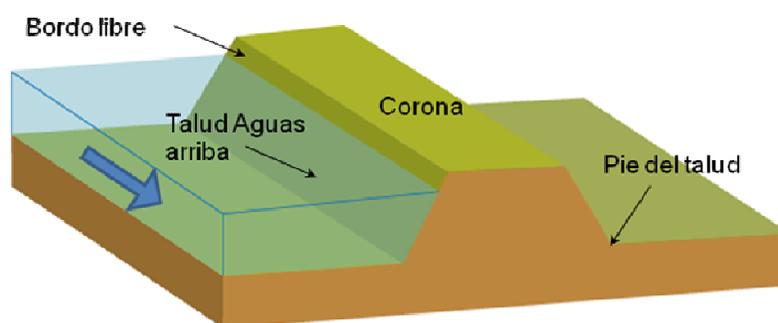


Figura 4.1 Componentes de un bordo de protección
(Modificado de <http://www.asce.org/files/pdf/SoYouLiveBehindLevee.pdf>, 2009)

Los componentes de un bordo (Figura 4.1) pueden generalizarse en:

Corona: Superficie en la parte superior del bordo que es más estrecho que la base.

Pie o punta: Lugar donde el talud del bordo se encuentra con el terreno natural.

Talud: superficie plana con inclinación que limita el cuerpo del bordo.

Borde libre: Espacio libre de agua entre la corona y el nivel de agua para controlar un nivel particular.

Los bordos pueden clasificarse de diferentes maneras. Como por ejemplo las siguientes: en función del tipo de terrenos que protegen, en urbanos o agrícolas; de acuerdo con su uso o propósito, en bordos longitudinales que pueden ser construidos a lo largo de los cauces o delimitando los cauces de alivio, y en perimetrales alrededor de poblados, ciudades o instalaciones de importancia; por último, por el procedimiento constructivo utilizado, en compactados o semicompactados (Maza y Franco, 1997).

4.2 Causas de falla en los bordos

Debe entenderse como falla al colapso del bordo o estructura térrea equivalente, así como a también a todo suceso que impida el cumplimiento de los objetivos para los que fue diseñada la obra (Mendoza, 1998). Se ha observado que la estabilidad de los distintos bordos existentes son varios y que dependen de las condiciones físicas en las que éstos se encuentren, y la influencia que puede llegar a tener el cauce del río (Auvinet *et. al.* 2008) o cuerpo de agua.

Las fallas en los bordos son causadas generalmente por los siguientes factores:

Erosión. Es el desgaste en alguna parte del bordo debido principalmente al oleaje (Figura 4.2) y puede provocar la pérdida parcial o total de una sección del bordo.

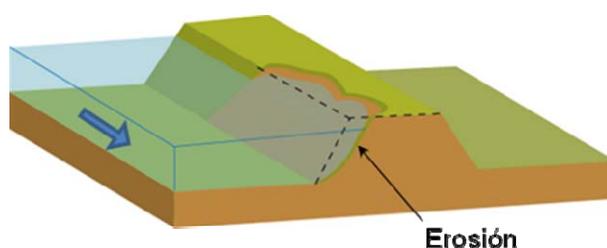
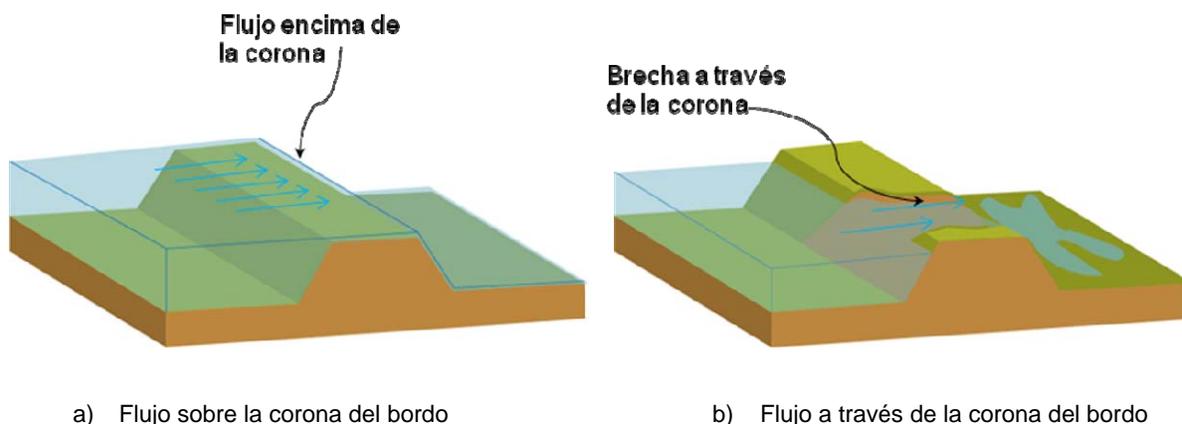


Figura 4.2 Efecto de la erosión en un bordo de protección.

Paso de agua sobre la corona del bordo. El nivel de agua sobrepasa la altura del bordo destruyendo poco a poco la corona del bordo (Figura 4.3a) hasta que se produce una abertura en el cuerpo del bordo. Si el cuerpo es arenoso, el fenómeno ocurre en poco tiempo y una vez que el bordo se ha roto, la abertura se amplía hacia ambos lados (Figura 4.3b).



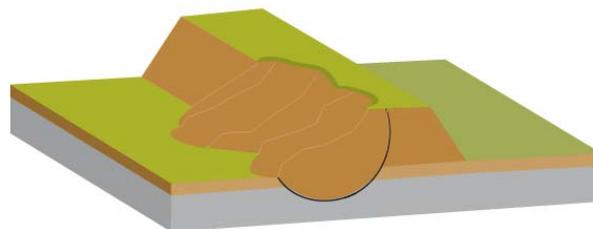
a) Flujo sobre la corona del bordo

b) Flujo a través de la corona del bordo

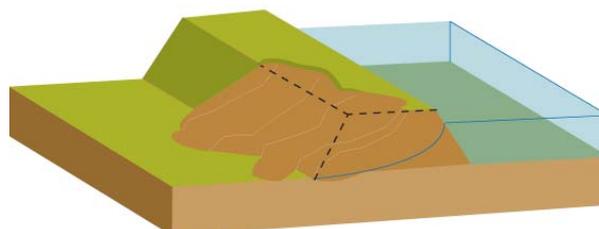
Figura 4.3 Efecto del flujo de agua sobre la corona de un bordo de protección.

Inestabilidad del talud debido a la resistencia cortante. Es la falla total o parcial del talud. Se presenta debido a la baja resistencia al esfuerzo cortante del suelo, en relación con cierta pendiente de los taludes y la altura del bordo (durante la construcción, Figura 4.4a), las condiciones anteriores más las fuerzas de filtración (durante su operación, Figura 4.4b) o, cuando se sujeta a fuerzas de filtración variantes en el tiempo (vaciado y llenado rápido, Figura 4.4c).

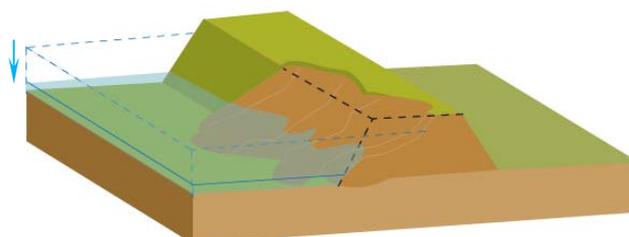
También se presenta cuando existe una sobre elevación del bordo cuando se trata evitar que el agua sobrepase la corona del bordo.



a) Durante la construcción



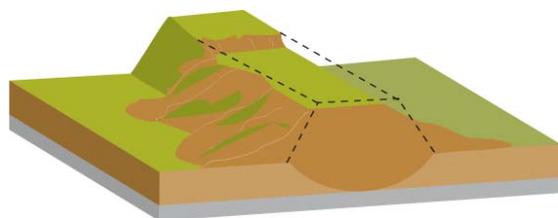
b) Durante la operación
-condición de flujo establecido-



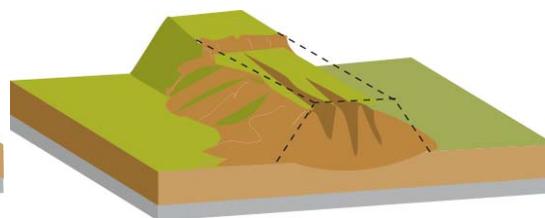
c) Inestabilidad por vaciado rápido

Figura 4.4 Inestabilidad de los bordos por falla al esfuerzo cortante.

Asentamientos. Es un reordenamiento excesivo del material del bordo provocado por la presencia de suelos blandos en la base del bordo (Figura 4.5a) o el agrietamiento relacionado con la saturación de una formación arenosa o limosa parcialmente saturada en regiones áridas (Figura 4.5b).



a) Asentamiento por la presencia de suelos blandos



b) Asentamientos y agrietamientos por saturación.

Figura 4.5 Inestabilidad de los bordos causados por asentamientos.

Agrietamiento transversal del bordo. Es el resultado de un cambio brusco en la compresibilidad y/o espesor de los materiales del subsuelo a lo largo del mismo (Figura 4.6).

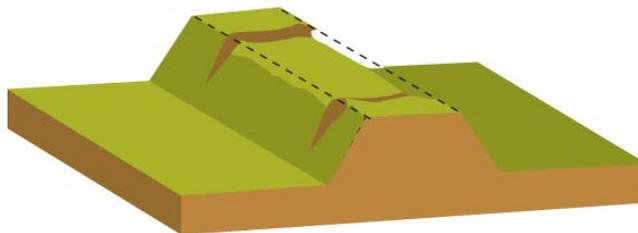
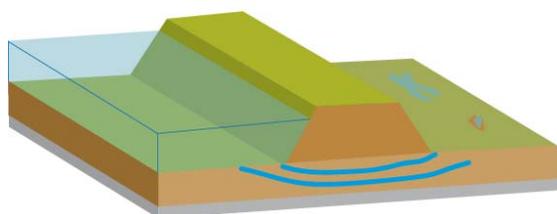


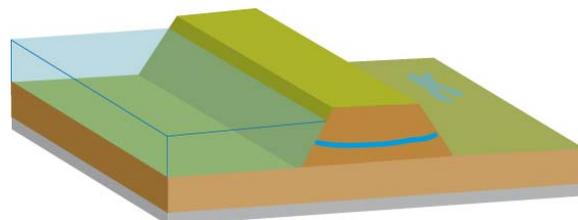
Figura 4.6 Inestabilidad de los bordos causados por agrietamiento transversal en el cuerpo del bordo.

Tubificación del bordo o de la cimentación. Se puede producir por dos causas principales. La primera cuando el flujo a través del cuerpo del bordo o de la cimentación alcanza a arrastrar el material en las zonas donde aflora. A medida que las partículas son arrastradas se forma un conducto que avanza de un lado a otro del bordo incrementando el gradiente hidráulico y la velocidad de flujo y por tanto el gasto que escurre por el conducto, lo que facilita el desprendimiento y la caída del material que está sobre él (Figura 4.6).

La segunda causa se produce debido a la acción de animales o bien a la presencia de raíces.



b) Tubificación de la cimentación



a) Tubificación del cuerpo del bordo

Figura 4.6 Inestabilidad de los bordos causados por tubificación.

4.3 Bordos de protección en la ciudad de Villahermosa

Para garantizar la seguridad de la población y la infraestructura que se ve en constante riesgo por el desbordamiento de los ríos y cuerpos de agua durante la temporada de lluvias, la ciudad de Villahermosa cuenta con un sistema de bordos de protección que controlan y contienen los excedentes de los ríos.

4.3.1 Clasificación de los bordos de protección en la ciudad de Villahermosa

Los bordos de protección en la ciudad de Villahermosa controlan el escurrimiento de los ríos y evitan que el agua fluya hacia las áreas urbanizadas. Los bordos de protección existentes pueden clasificarse de manera general en dos tipos:

- Bordos en las márgenes de los ríos: Son los bordos que se encuentran en las márgenes de los ríos (Figura 4.7a), están contruidos en las márgenes de los ríos Carrizal, Grijalva y de La Sierra.
- Bordos de defensa: Construidos por el gobierno del estado, los bordos de defensa corren paralelos a los cauces de los principales ríos y cuerpos de agua (Figura 4.7b) para controlar los cambios en el nivel de agua y evitar el escurrimiento hacia las zonas urbanas.



(a) Bordo en la margen



(b) Bordo de defensa

Figura 4.7 Tipos de bordos de protección (Auvinet *et. al.*, 2008)

4.3.2 Datos geométricos

Se puede generalizar la geometría de los bordos de protección en dos tipos, con dos secciones tipo (Tipo 1 y Tipo 2) para el cuerpo del bordo en cada caso, cuyas características se mencionan a continuación.

Para el primer tipo de bordo construido, se caracteriza por tener taludes en proporción 2:1, un ancho de corona de 4 y 7m, y una altura variable (dependiendo de la topografía del terreno) con valor mínimo de 1.12m y valor máximo de 5.72m. Se presentan las dos secciones tipo para este tipo de bordos en las Figuras 4.8 y 4.9.

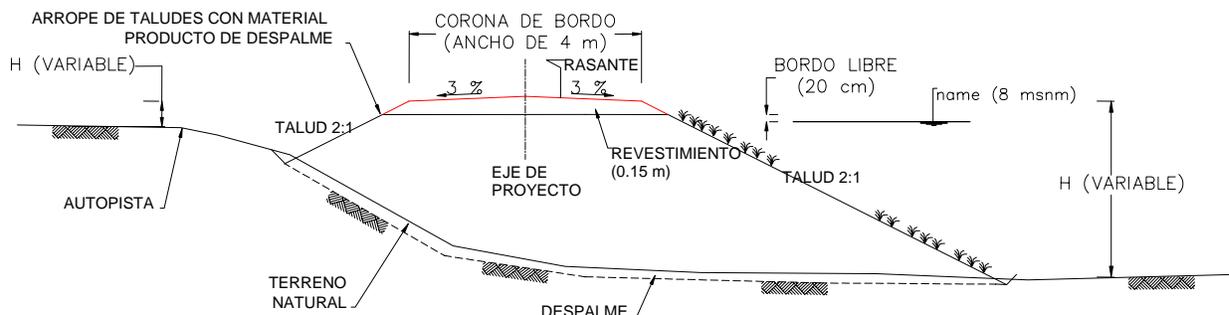


Figura 4.8. Sección Tipo 1 (Auvinet et. al. 2008).

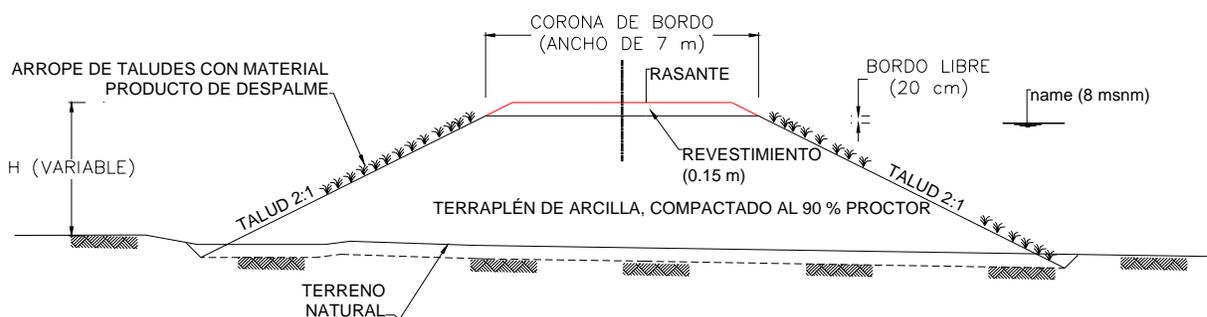


Figura 4.9. Sección Tipo 2 (Auvinet et. al. 2008).

Para el segundo caso, el bordo construido tiene taludes en proporción 1.5:1, un ancho de corona de 4 y 6m, y una altura variable (dependiendo de la topografía del terreno) con valores mínimos de 0.5 y 0.9m y valor máximo de 5.7m. Se presentan las dos secciones tipo para este tipo de bordos en las figuras 4.10 y 4.11.

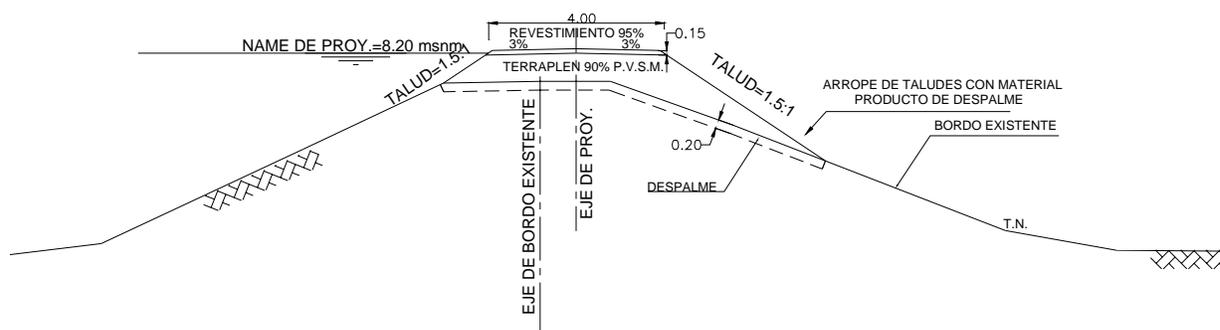


Figura 4.10. Sección Tipo 1 (Auvinet et. al. 2008).

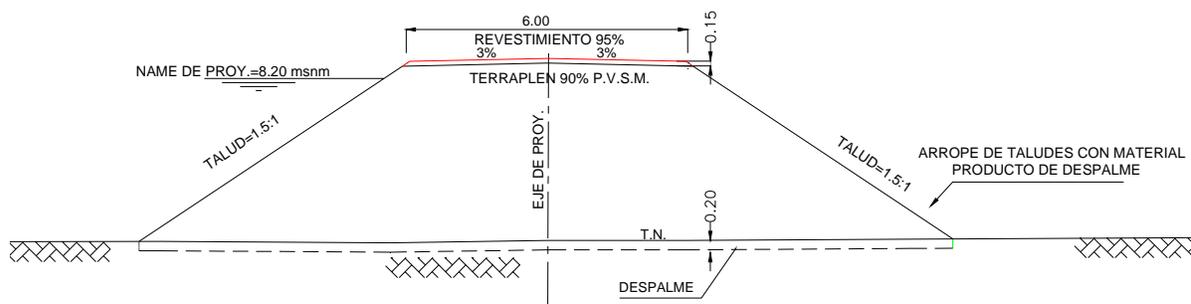


Figura 4.11. Sección Tipo 2 (Auvinet *et. al.* 2008).

4.3.3 Materiales constitutivos de los bordos

De manera general, el cuerpo de los bordos de protección está constituido de los siguientes materiales (Auvinet *et. al.* 2008):

- Arcilla limo-arenosa de baja plasticidad (CL).
- Arena limo-arcillosa de baja plasticidad (SM).
- Arcilla-limosa orgánica de alta plasticidad (OH)
- Mezclas de grava-arena fina y limo (GW).

4.3.4 Características del suelo de cimentación.

De acuerdo la información revisada por el Instituto de Ingeniería (Auvinet *et. al.*, 2008) para los bordos de protección de tipo uno (Figuras 4.8 y 4.9) se puede generalizar que el subsuelo a lo largo del trazo de este tipo de bordo está constituido por un estrato superior de arena arcillosa (SC) o arcilla arenosa de baja plasticidad (CL) con espesor variable de 0.6 a 1.4m, seguido por un estrato de arcilla orgánica de alta plasticidad o limo arcilloso orgánico de alta plasticidad (OH) con espesor variable de 1 a 2m.

Para el segundo tipo (Figuras 4.10 y 4.11), en algunos tramos del bordo predominan las arcillas de alta plasticidad (CH) y arcillas arenosas de baja plasticidad (CL) de consistencia media a semidura; solamente en una parte del bordo se encontró arcilla orgánica a una profundidad de 24.2m con un espesor de 2.2m.

Para otras partes, el subsuelo está constituido principalmente por arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH) y limos inorgánicos de alta plasticidad (MH) de consistencia muy blanda a blanda, existiendo la presencia de materia orgánica (Pt) de consistencia muy blanda con espesores que varían de 1.8 a 4.8m. En el resto de los tramos a lo largo del trazo del bordo, solamente se sabe que existe una arcilla limosa de alta plasticidad (CH) hasta una profundidad de 2.5m (información de pozos a cielo abierto).

Para el caso de las márgenes de los ríos, se puede decir, que los estratos del subsuelo tanto de los ríos Grijalva y Carrizal presentan una gran erraticidad debido a su naturaleza aluvial. Esta erraticidad resulta más remarcada a lo largo del río Carrizal; en este caso, el subsuelo está constituido en su mayoría por arcillas arenosas, arcillas inorgánicas y limos inorgánicos que se caracterizan por ser de baja y alta plasticidad y consistencia muy blanda a media hasta una profundidad que varía entre 20m y 30m. Se encontró que la consistencia de estos estratos aumenta conforme se avanza hacia aguas abajo del río Carrizal.

Además, se nota la presencia de materia orgánica (turba) a profundidades variables entre 13m y 20m (con espesores de 0.4m a 6.8m). Llama la atención la diferencia en la consistencia de este material (turba) a lo largo del río Carrizal: presenta una consistencia dura en donde los demás estratos también son de consistencia media a dura o rígida (Auvinet *et. al.*, 2008).

En cuanto a las características estratigráficas del subsuelo de las márgenes del río Grijalva, se encontraron intercalaciones de estratos de arcilla o arcilla limosa de consistencia media a semidura o dura, con estratos de arena arcillosa de compacidad suelta a media. Es decir, existen contrastes importantes entre las consistencias y compacidades de los materiales del subsuelo de estas zonas

4.3.5 Causas de inestabilidad observadas

Se entiende como falla el colapso del bordo o estructura térrea equivalente, así como también todo suceso que impida el cumplimiento de los objetivos para los que fue diseñada la obra (Maza y Franco, 1997).

Las principales causas de inestabilidad observadas a lo largo de los márgenes de los ríos Carrizal de la Sierra y Grijalva son (Auvinet *et. al.* 2008).

- *Erosión en las márgenes.*- Ocasionada por el ataque de las líneas de corriente y turbulencias del agua de los ríos; el cual se ha intensificado con el transcurso del tiempo debido a la modificación topográfica del curso natural meándrico y a las restricciones impuestas a la divagación natural de los ríos provocadas por el crecimiento urbano (M. Ramírez, 2008).
- *Falla por cortante del suelo de cimentación.*- Que en este caso se ve favorecida por factores como el flujo de agua a transitorio (vaciado y llenado rápido) y la sobrecarga del terreno. Esta presión adicional transmitida al suelo, debida primero a la colocación de bordos, después a la sobre-elevación de éstos y finalmente a la colocación de costales rellenos de suelo-cemento, tapetes flexibles, colchacreto, etc., es evidente que en todos los sitios de daños ha excedido la capacidad de carga admisible del suelo de cimentación.
- *Socavación general.*- Se origina cuando la corriente de agua que se desplaza en el cauce de los ríos tiene la capacidad de suspender y arrastrar las partículas sólidas que constituyen el suelo del lecho. Aunque no se aprecia físicamente, se sabe que este fenómeno se ha presentado principalmente en las crecientes, época en las que resulta especialmente peligroso.

En general, el problema en las márgenes de los ríos comienza con la *erosión* (Figuras 4.12 y 4.15) de las mismas. Posteriormente, con las soluciones adoptadas para proteger las márgenes de este ataque erosivo del agua, no se ha tenido cuidado con el peso transmitido por la protección marginal colocada (Figura 4.13), y éste ha sobrepasado la capacidad admisible del suelo, constituido ya sea por estratos de arcilla de alta plasticidad muy compresible además de presencia importante de materia orgánica (turba), de consistencia blanda (Figura 4.14); o bien, por mezclas de estratos arcillosos de consistencia media a dura o rígida y estratos arenosos de compacidad suelta a media. Finalmente, esta inestabilidad de las márgenes se ve agravada por la socavación del lecho de los ríos.

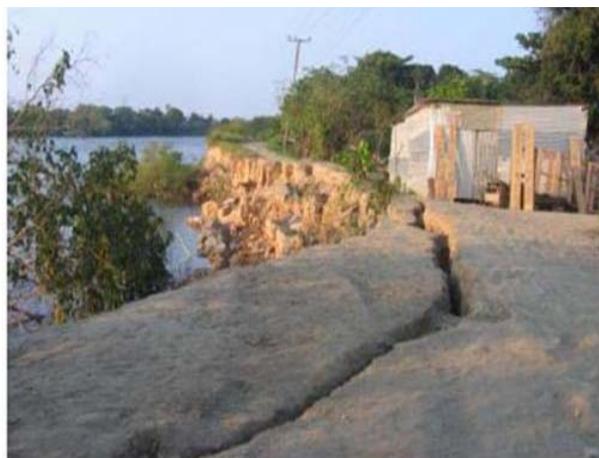


Figura 4.12 inestabilidad favorecida por erosión fluvial (Auvinet *et. al.*, 2008)



Figura 4.13 Falla de talud favorecida por cortante, favorecida por el peso del bordo. (Auvinet *et. al.*, 2008)



Figura 4.14 Falla de talud favorecida por sobrecarga del bordo, erosión al pie y condición de vaciado rápido en suelo medianamente blando. (Auvinet *et. al.*, 2008)



Figura 4.15 Erosión fluvial (Auvinet *et. al.*, 2008)

4.4 Métodos para incrementar la seguridad en los bordos

Para contribuir a la estabilidad de las márgenes de los ríos se sugiere tener presentes las siguientes recomendaciones (Auvinet et. al, 2008):

(a) Evitar erosión al pie del talud.- Las medidas de protección contra erosión en las márgenes de un río tienen como objetivos evitar el contacto directo entre el flujo con alta velocidad y el material que forma la orilla; así como, guiar o conducir el flujo en una dirección deseada o conveniente. Las principales estructuras empleadas con estos fines son:

—*Espigones*.- Son estructuras interpuestas a la corriente, uno de cuyos extremos está unido o empotrado una cierta longitud dentro de la margen.

—*Recubrimientos o muros marginales*.- Son protecciones que consisten en colocar, directamente sobre la orilla, un material natural o artificial que no pueda ser arrastrado por la corriente, por ejemplo: protección con enrocamiento, protección con bloques, bolsacreto, tapete flexible, etc., también se han llegado a emplear muros de concreto armado y/o tablestacado.

—*Diques marginales*.- Son estructuras, en ocasiones de gran longitud, colocadas dentro del cauce y que se utilizan cuando se quiere formar una nueva orilla que permita encauzar el flujo en forma más adecuada o cuando se desea reducir el ancho del río. Los diques se colocan y diseñan para lograr que las líneas de corriente sean paralelas a dichas obras.

(b) Evitar falla por cortante de taludes:

—No construir con materiales finos saturados.

—Dar poca pendiente a los taludes (Figura 4.18a).

—No sobrecargar los taludes con bordos de protección pesados (Figura 4.18b).

—Incorporar drenaje en la sección transversal para evitar los efectos del vaciado rápido (camas de arena limpia con tubos drenantes perforados de PVC o albañal envueltos en geotextil).

—Evitar drenaje domiciliario a través del talud.

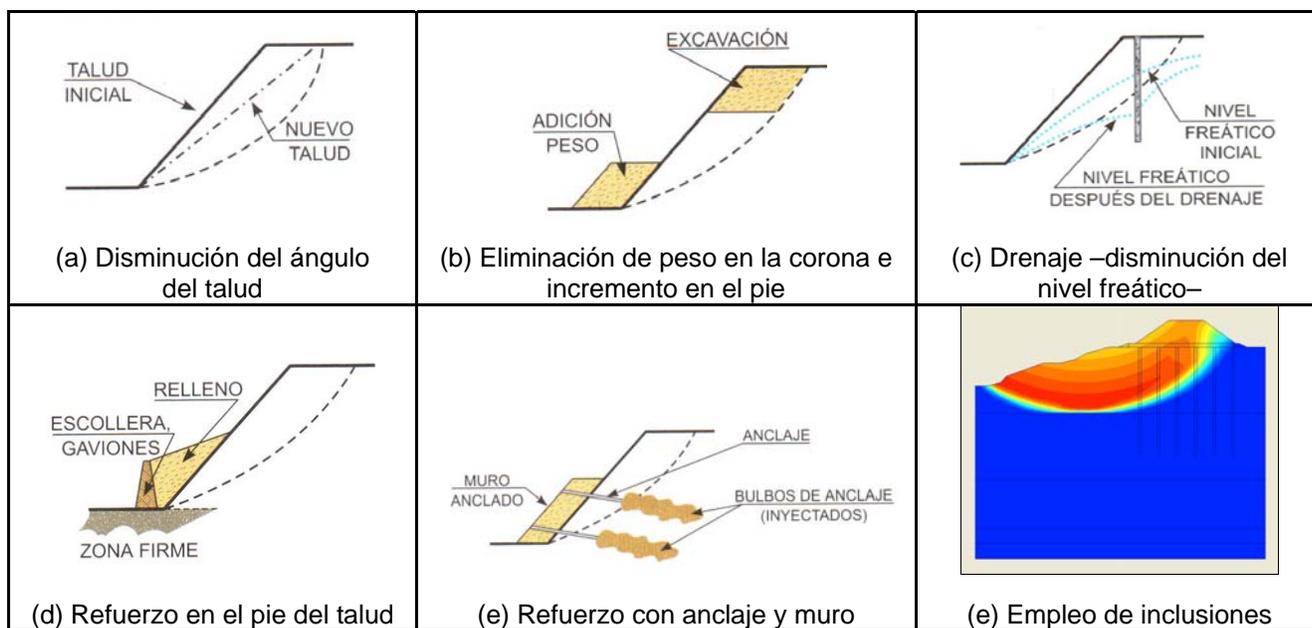


Figura 4.18 Métodos para incrementar la seguridad de taludes de bordos (Auvinet *et. al.*, 2008)

5. Modelación del flujo transitorio de agua en bordos de protección

Con el fin de estudiar el comportamiento de los bordos de protección sometidos al flujo transitorio debido a los fenómenos de llenado y vaciado rápido, se presentan diferentes casos en los que se analiza el comportamiento del flujo de manera bidimensional. Primeramente se propone un modelo simplificado de un bordo de protección localizado en la margen de los ríos, para estudiar el comportamiento de las velocidades de flujo y los gradientes hidráulicos generados para cada fenómeno de manera independiente. Para cada caso se realiza un estudio paramétrico para conocer la influencia que tienen las propiedades físicas de los bordos sobre la forma de las líneas de saturación y desaturación, así como las velocidades y gradientes máximos en zonas críticas.

Finalmente se realiza una modelación del flujo transitorio para un bordo de protección de áreas urbanas, haciendo énfasis en el comportamiento de las velocidades de flujo y gradientes hidráulicos para diferentes puntos de interés dentro del cuerpo del bordo, adicionalmente se presentan los resultados de un análisis paramétrico en el que se hace variar la velocidad de llenado y de vaciado y se analiza la manera en que influyen en el comportamiento del bordo.

5.1 Análisis del flujo transitorio para un bordo de protección en la margen de los ríos

Para el cálculo de las distintas líneas de desaturación y de saturación generadas a lo largo del tiempo de abatimiento o incremento del nivel de agua, se utilizaron los métodos analíticos propuestos por Jesús Alberro (2001 y 2002) con ayuda del programa *Dflow*, y el método de elementos finitos a través del programa *Plaxflow* (Delft University of Technology, 2006). Además, con este último método se obtienen las variaciones del campo de velocidades, el grado de saturación y la carga hidráulica, para diferentes etapas y zonas de interés dentro del cuerpo del bordo.

Se admite que para ambos fenómenos (vaciado y llenado rápido) el talud está en proporción 2:1, el cuerpo del bordo está constituido por un material homogéneo e isótropo con un coeficiente de conductividad hidráulica $k = 1 \times 10^{-5}$ m/s y porosidad $n = 0.3$ (relación de vacíos $e=0.43$). La geometría del bordo para realizar la modelación se muestra en la Figura 5.1

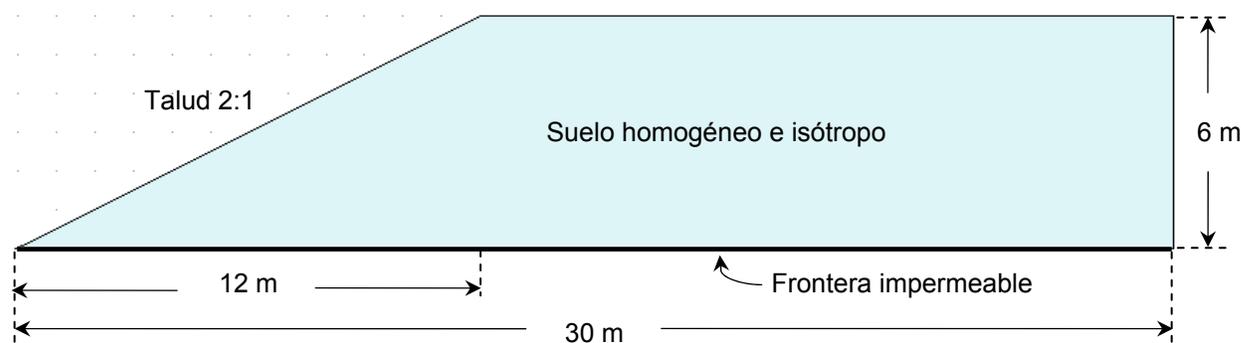


Figura 5.1 Geometría del bordo de protección en la margen de los ríos en condiciones simplificadas.

Para establecer la variación en el nivel de agua durante el vaciado y llenado rápido, se tomó en cuenta la información contenida en los boletines hidrométricos y de presas publicados por CONAGUA, acerca del nivel de los ríos cercanos a la ciudad de Villahermosa, durante los periodos comprendidos entre octubre y noviembre de 2007 y 2008.

5.1.1 Flujo transitorio durante el vaciado rápido

Para modelar las etapas de vaciado rápido, se determinó una velocidad constante de abatimiento de 1.1 metros/día. El abatimiento total del estudio es de 5.5 metros alcanzado después de 5 días de vaciado. Se asume que nivel de agua en la cara de talud se abate desde su nivel inicial en 5.5 metros hasta su nivel final en 0 metros, mientras que en el extremo derecho del bordo, el nivel de agua se mantiene constante. Las condiciones de frontera para realizar la modelación del vaciado rápido se muestran en la Figura 5.2.

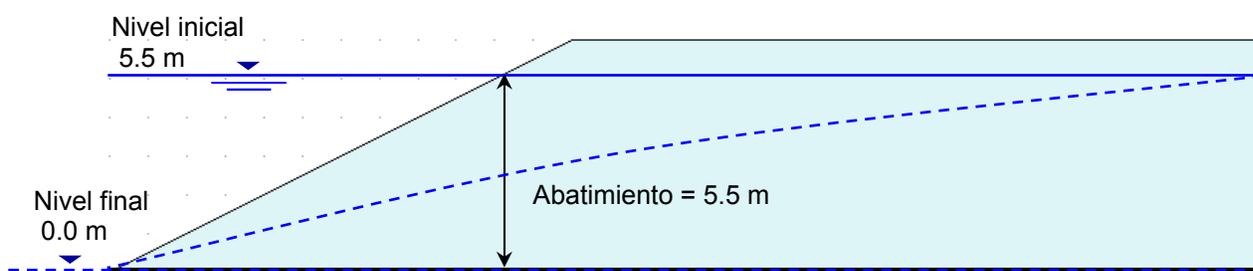


Figura 5.2 Condiciones de frontera consideradas para el vaciado rápido.

A continuación se muestran los resultados del análisis de flujo transitorio cuando ocurre el vaciado rápido.

5.1.1.1 Flujo transitorio sin considerar la aportación del agua de lluvia

La Figura 5.3 muestra diferentes etapas durante el abatimiento del nivel de agua, donde se observa la variación en el grado de saturación del bordo y el comportamiento de las líneas de *abatimiento* o de *desaturación* mientras ocurre el vaciado. Es importante resaltar que en el caso del flujo transitorio las líneas de superficie que se generan dentro del cuerpo del bordo durante el vaciado rápido sólo separan a la zona saturada de la no saturada (López-Acosta y Auvinet, 2009) y no pueden considerarse líneas de flujo o de corriente (Freeze, 1971) como sucede para el flujo establecido. Otros autores prefieren llamarlas líneas freáticas (Lam y Fredlund 1984; Lam et al. 1987; Huang Jia y 2009). En lo que sigue las líneas generadas durante el vaciado rápido dentro del cuerpo del bordo se denominarán líneas de *desaturación*.

Las líneas obtenidas presentan las siguientes características

- Están a la presión atmosférica
- No son líneas de flujo ni equipotenciales
- En aquellos puntos donde son intersecadas por líneas equipotenciales, cumplen con la propiedad de $h=z$ (carga hidráulica igual a carga de posición)

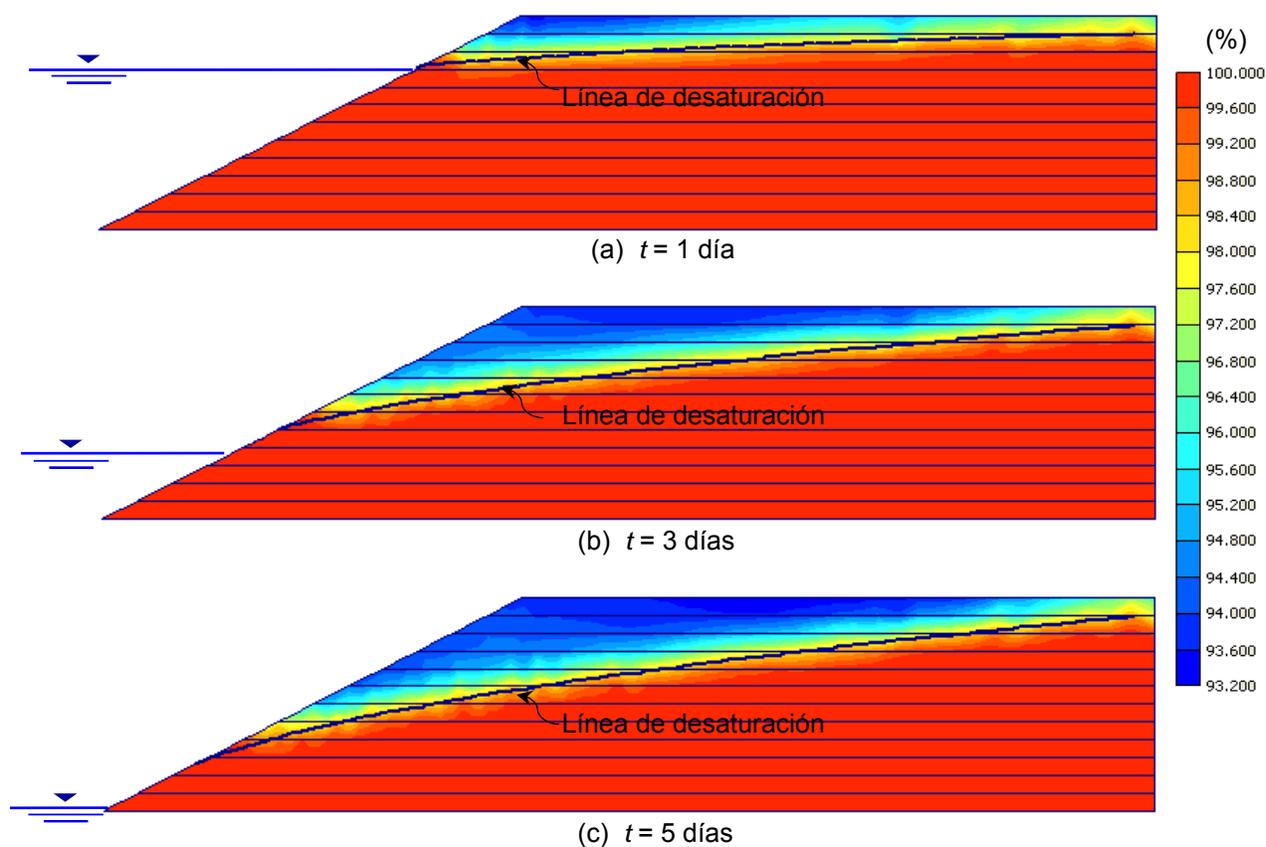


Figura 5.3 Variación del grado de saturación del bordo y líneas de desaturación para distintas etapas del vaciado rápido.

En las Figuras 5.4 y 5.5 se muestran las líneas de desaturación calculadas a través del método analítico propuesto por J. Alberro y las obtenidas con el programa *Plaxflow* respectivamente. Las líneas muestran una enorme similitud entre ellas para las mismas etapas de vaciado, aunque el fenómeno no cumple estrictamente con la hipótesis de Polubarinova-Kochina acerca de la cuasi-verticalidad de las líneas equipotenciales (Figura 5.6), condición que se utiliza en la resolución aplicada por Alberro para la ecuación diferencial que rige el flujo transitorio en un medio homogéneo (Ecuación 18).

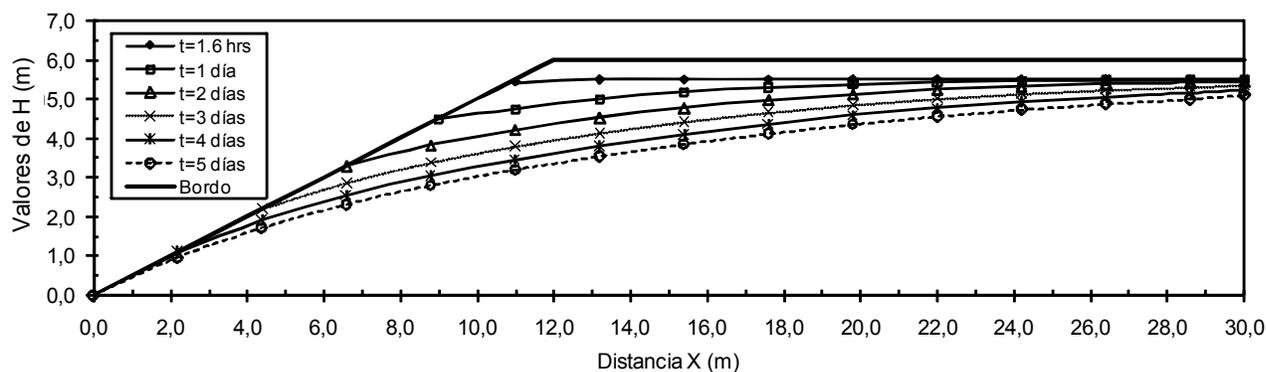


Figura 5.4 Variación de la línea de desaturación obtenida con la solución analítica de Alberro para diferentes tiempos durante el vaciado rápido.

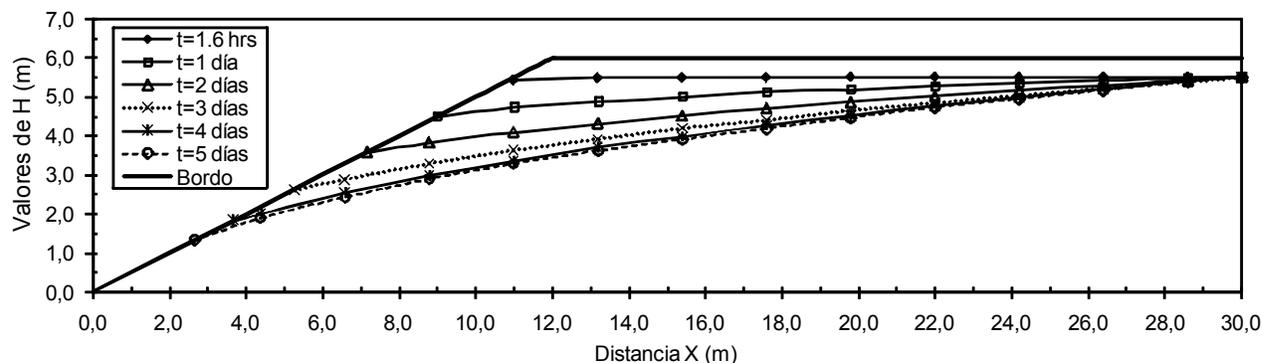


Figura 5.5 Variación de la línea de desaturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaxflow*) para diferentes tiempos durante el vaciado rápido.

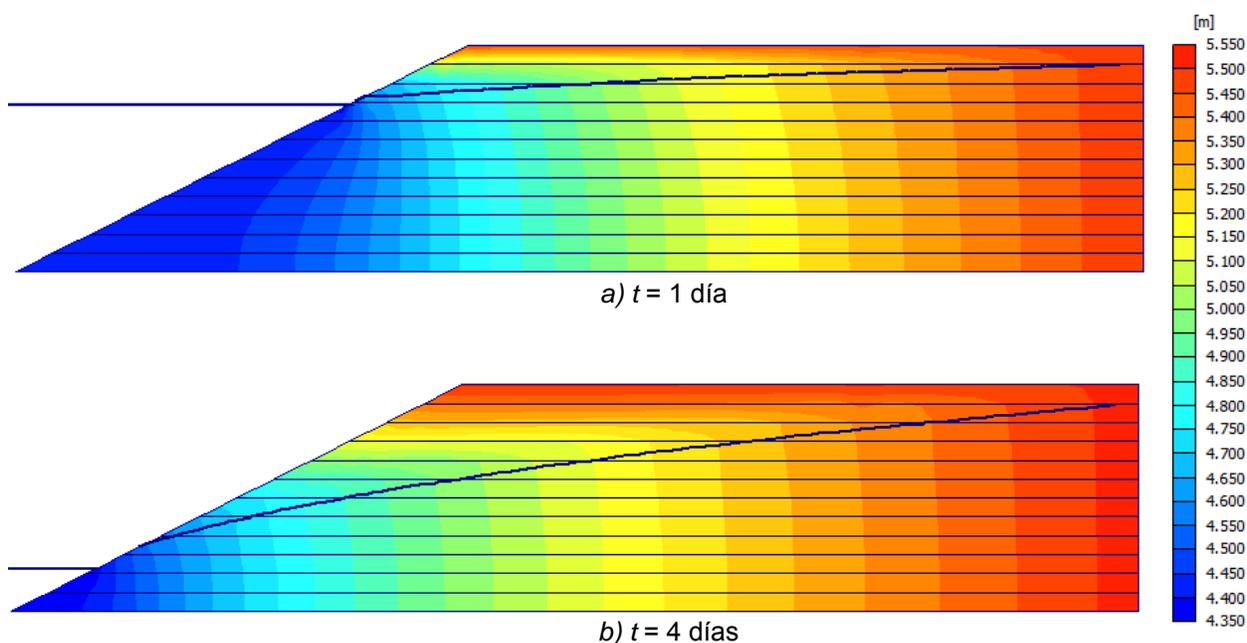


Figura 5.6 Variación de la carga hidráulica para diferentes tiempos durante el vaciado.

Al obtener la magnitud del campo de velocidades para diferentes etapas del vaciado (Figura 5.7) se observa que la velocidad máxima de flujo para cualquier instante se alcanza cerca de la cara del talud, por encima de la línea del nivel freático exterior y por debajo de la línea de desaturación.

En la Figura 5.8 se muestra la gráfica de la velocidad máxima de flujo (v_{max}) que se alcanza para los distintos niveles de abatimiento durante los 5 días. El mayor valor que alcanza la velocidad máxima de flujo ($v_{max} = 4.99 \times 10^{-6}$ m/s) se obtiene al final del vaciado al pie del talud (Figuras 5.7c y 5.8).

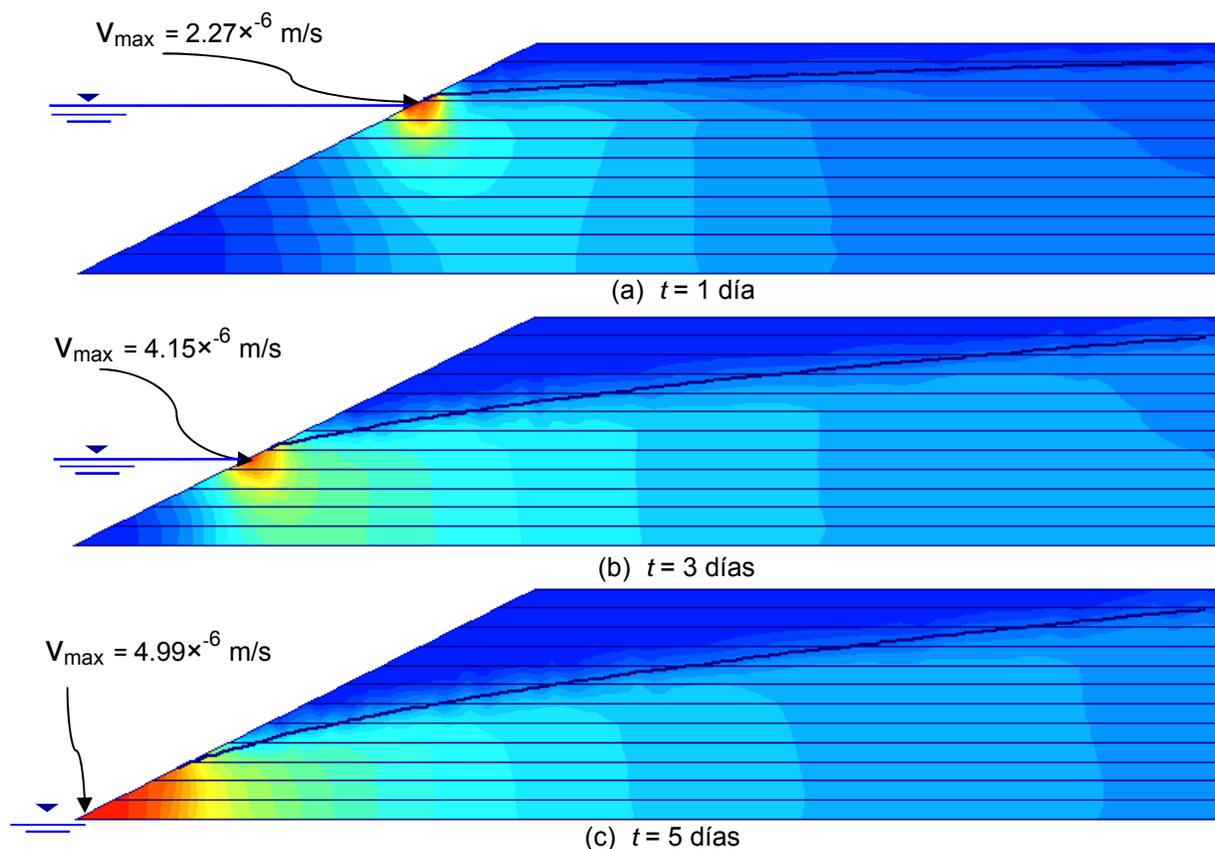


Figura 5.7 Variación de la magnitud de la velocidad de flujo para diferentes tiempos de vaciado.

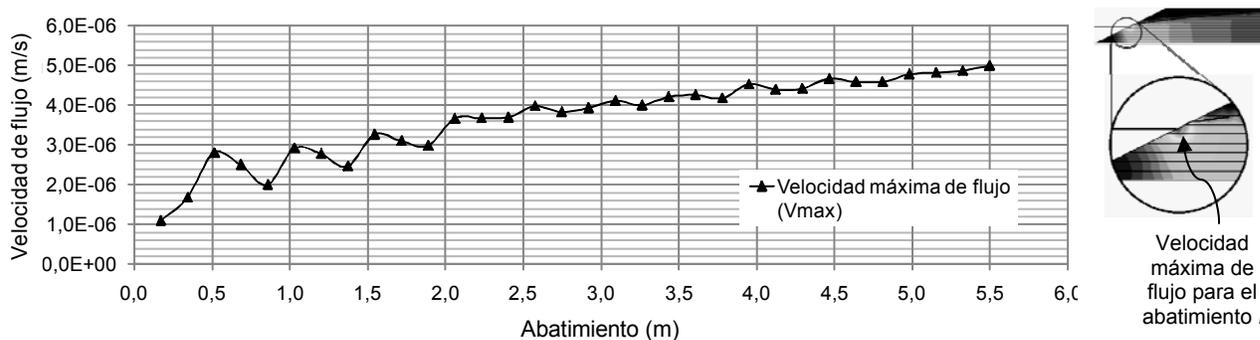


Figura 5.8 Incremento del valor del velocidad máxima de flujo que se presenta cerca a la cara del talud.

También es posible comprobar que las velocidades horizontales no permanecen constantes con respecto a la profundidad. En la Figura 5.9 se muestra la variación de las velocidades horizontales por medio de tres secciones realizadas a lo largo del bordo durante una etapa del vaciado. En el cuerpo del bordo, (sección C-C') se observa que las velocidades pueden considerarse constantes, sin embargo, las velocidades cercanas al talud, ya no tienen este mismo comportamiento (secciones B-B' y A-A').

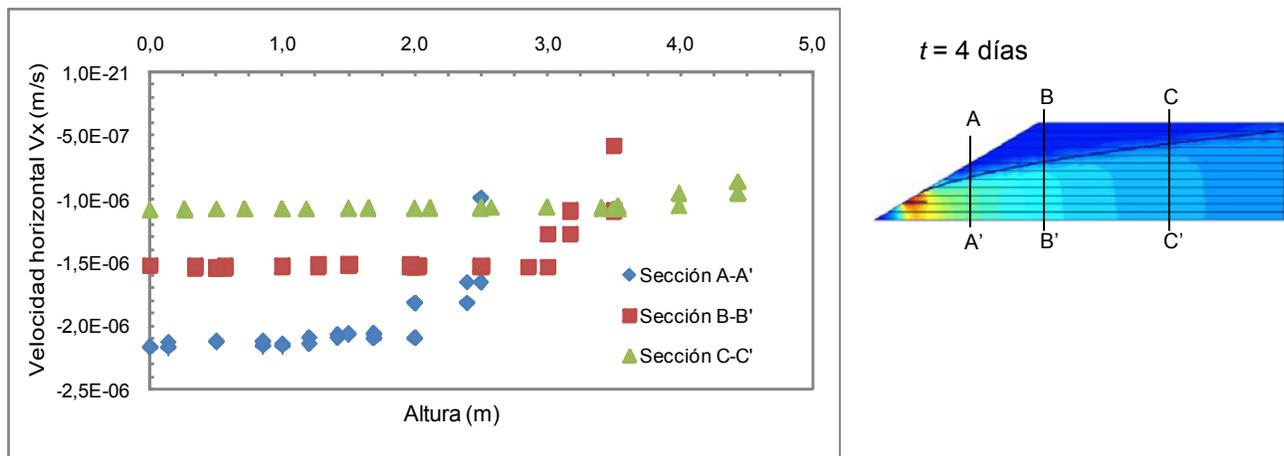


Figura 5.9 Variación de la velocidad horizontal V_x respecto a la altura en diferentes secciones del bordo.

Como ya se mencionó, es importante distinguir que las líneas de desaturación presentes durante el fenómeno de vaciado, no son estrictamente líneas de flujo, condición que se comprueba al observar el campo de vectores de velocidad (Figura 5.10) donde la línea de desaturación es cruzada por los vectores de velocidad con diferentes ángulos.

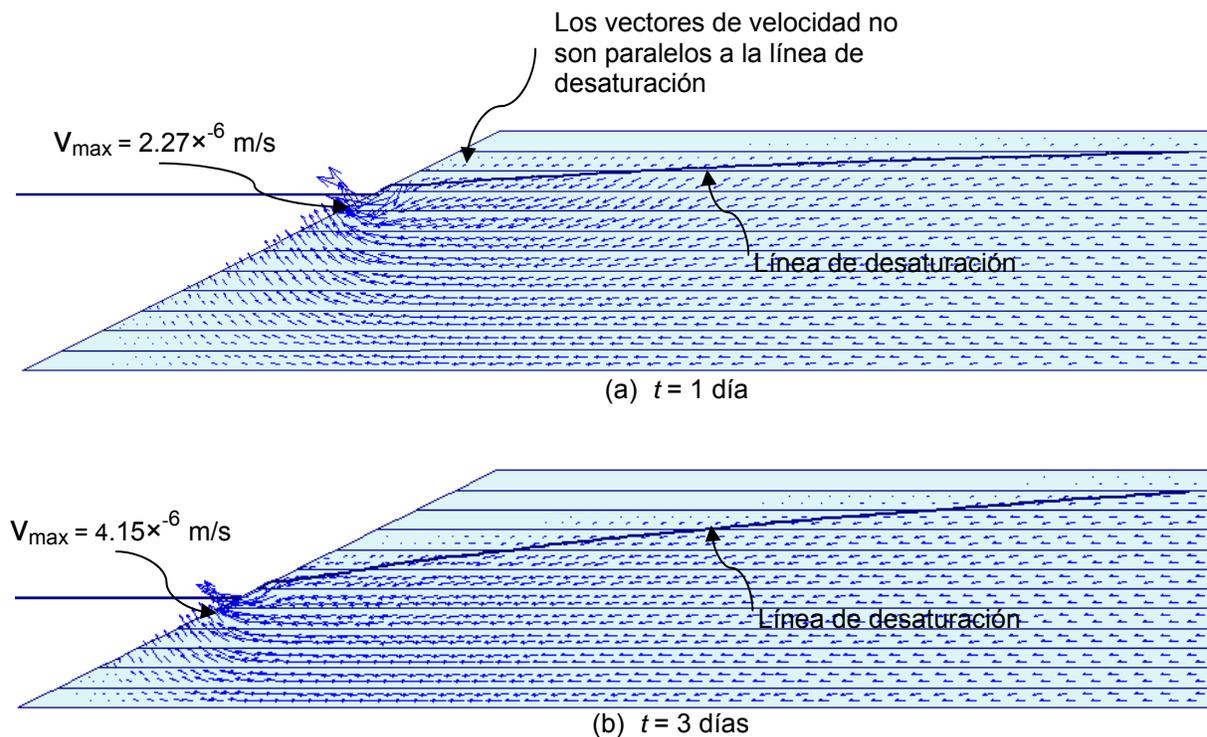


Figura 5.10 Vectores de velocidad para distintos instantes durante el vaciado rápido

5.1.1.2 Flujo transitorio considerando la aportación del agua de lluvia

Para realizar el análisis se tomó en cuenta un valor de precipitación de 80 mm/día, correspondiente al valor promedio de las lluvias ocurridas en 2007 durante los meses de octubre y noviembre. Para este caso no se presentan líneas de desaturación por que el material se encuentra saturado debido a la aportación de agua de lluvia (Figura 5.11).

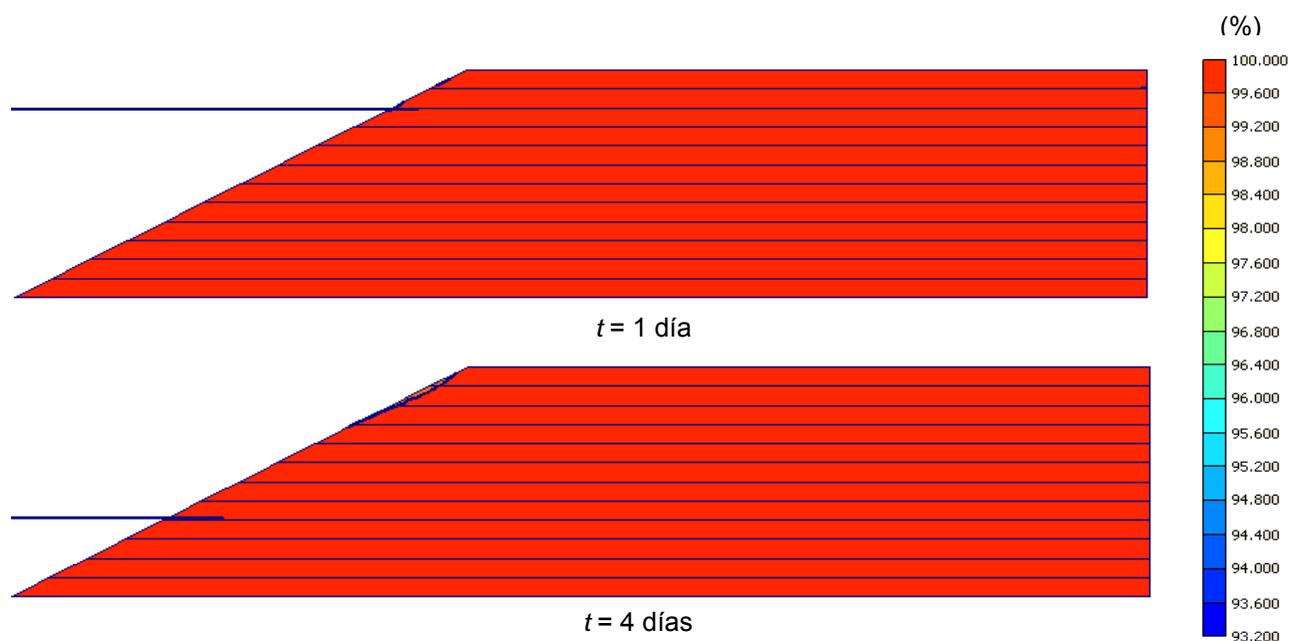


Figura 5.11 Variación del grado de saturación cuando se considera la aportación del agua de lluvia

La consideración del agua de lluvia afecta directamente la velocidad de flujo y el gasto. En estas condiciones, el gasto en la cara del talud aumenta más de dos veces a lo largo de todas las etapas del vaciado. En la Figura 5.12 se presenta la gráfica donde se observa diferencia entre ambos gastos. Para las velocidades de flujo, éstas alcanzan su valor máximo al inicio del vaciado cerca del nivel de agua pegado a la cara del talud. La velocidad disminuye conforme el nivel de agua se abate, sin embargo se aprecian velocidades altas en toda la cara del talud y no sólo en la base, como sucede en el caso donde no se considera el aporte del agua de lluvia (Figura 5.13c)

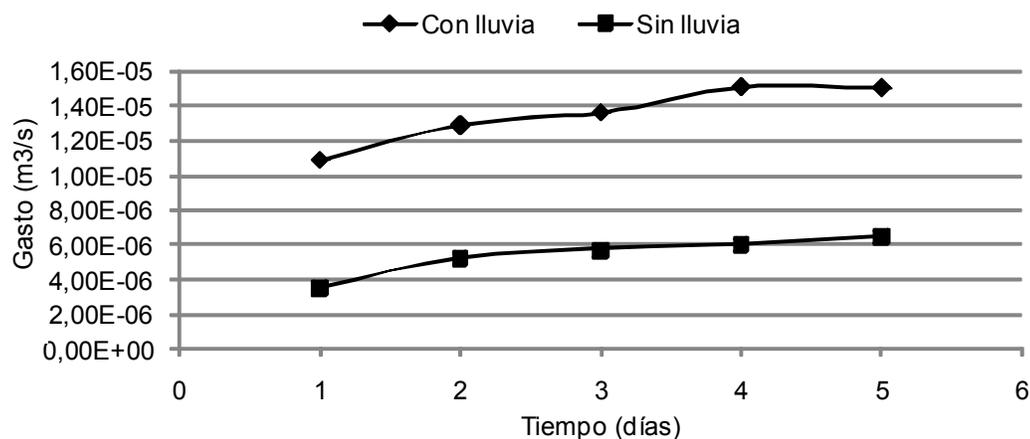


Figura 5.12 Gastos de salida en la cara del talud para el vaciado rápido.

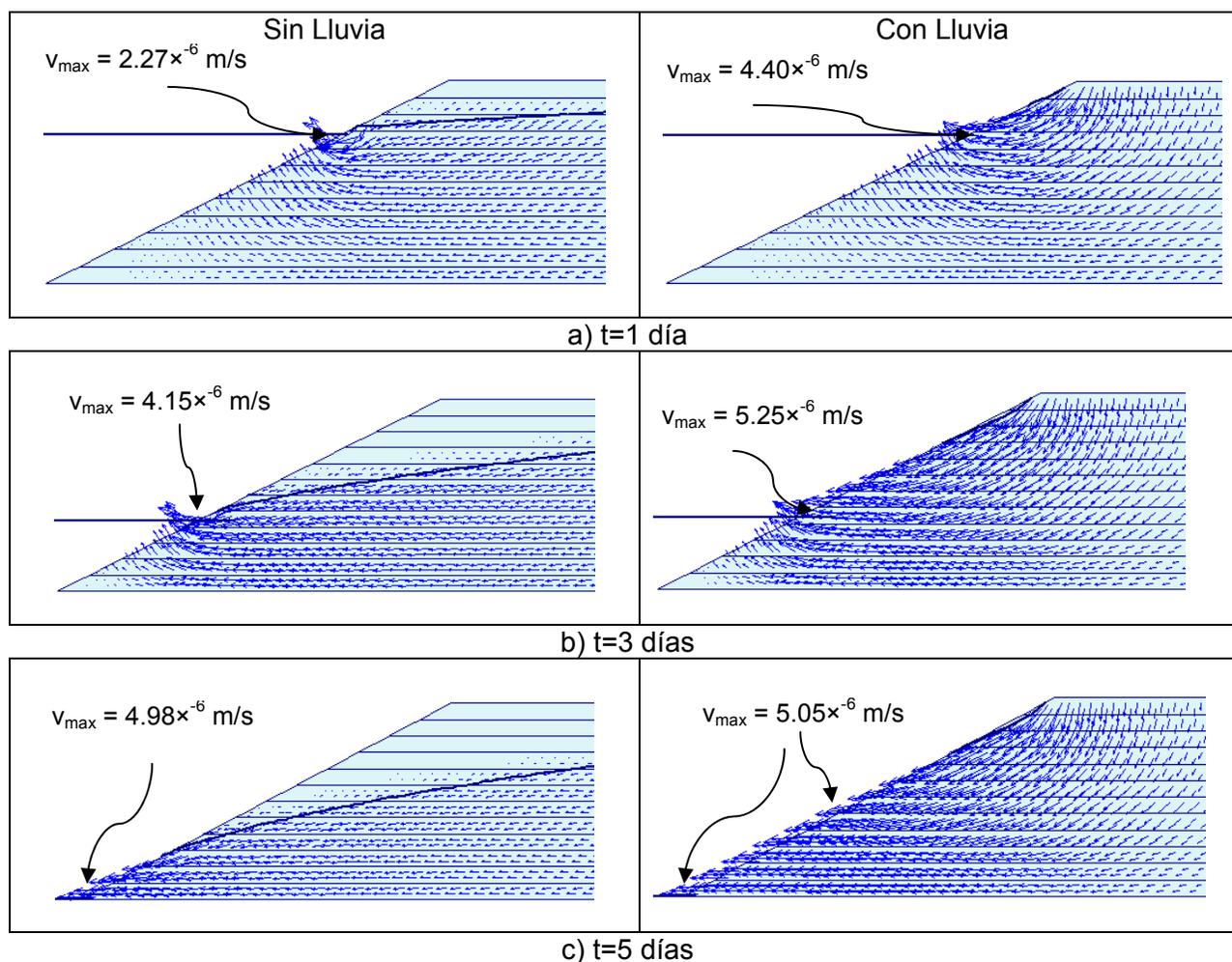


Figura 5.13 Comparación de los vectores de velocidad obtenidos del análisis que toma en cuenta el agua de lluvia y el análisis que no toma en cuenta la aportación del agua de lluvia.

5.1.1.3 Estudio paramétrico para el vaciado rápido

Para realizar el análisis se tomaron en cuenta los parámetros más significativos que afectan a la velocidad de flujo y los gradientes hidráulicos generados dentro del cuerpo del bordo (conductividad hidráulica, velocidad de vaciado y ángulo del talud). Para cada parámetro se calcularon las distintas líneas de desaturación con los métodos analítico y numérico y se estudió el comportamiento de las velocidades de flujo y gradientes en puntos de interés dentro del cuerpo del bordo.

a) Variación de la conductividad hidráulica

Para el primer análisis se modificó el valor de la conductividad hidráulica del material entre los valores de 1×10^{-2} m/s y 1×10^{-8} m/s manteniendo constante la velocidad de llenado en 1.1 m/día y el valor del ángulo del talud en proporción 2:1. En las Figuras 5.14 y 5.15 se muestran las distintas líneas de desaturación para el final del vaciado obtenidas para distintos coeficientes de conductividad hidráulica. Para ambos casos existe una disminución en la altura H de las curvas de desaturación y una disminución de la línea de descarga libre conforme la conductividad hidráulica aumenta. Es importante mencionar que para conductividades hidráulicas mayores a 1×10^{-5} m/s, las curvas de desaturación son muy parecidas entre sí (Figura 5.15), donde las curvas obtenidas con el método de elemento finito para conductividades hidráulicas altas coinciden sobre la misma línea.

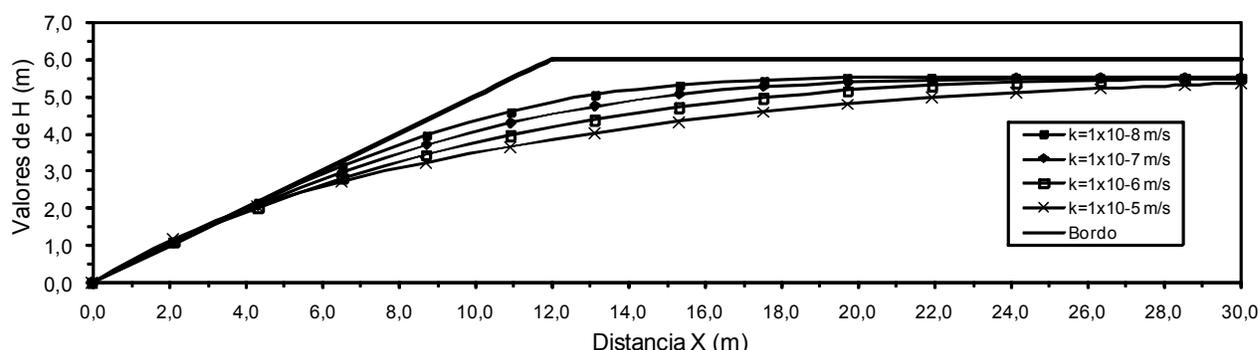


Figura 5.14 Variación de la línea de desaturación obtenida con la solución analítica de Alberro para diferentes conductividades hidráulicas al final del vaciado rápido.

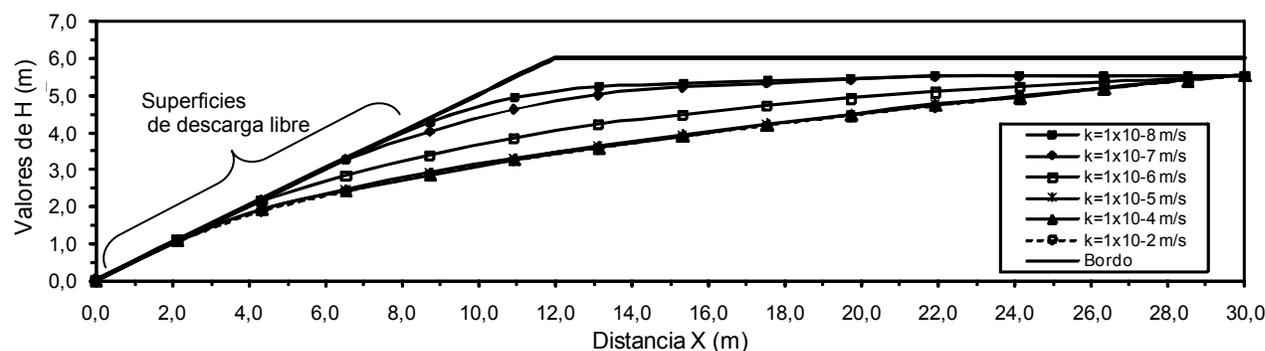


Figura 5.15 Variación de la línea de desaturación obtenida con el método de elemento finito (Plaflow) para diferentes conductividades hidráulicas al final del vaciado rápido.

Para las velocidades de flujo, en la Figura 5.15 se muestran las velocidades obtenidas al pie del talud. Se observa que la velocidad de flujo al final del vaciado es directamente proporcional a la conductividad hidráulica del material del bordo, es decir, el orden de magnitud de la velocidad máxima es el mismo que el de la conductividad hidráulica del bordo. Sin embargo, mientras ocurre el vaciado, el intervalo de velocidades para conductividades hidráulicas altas es más amplio, si se compara con el intervalo de velocidades alcanzados en un materiales de conductividades hidráulicas bajas, donde la velocidad es más constante.

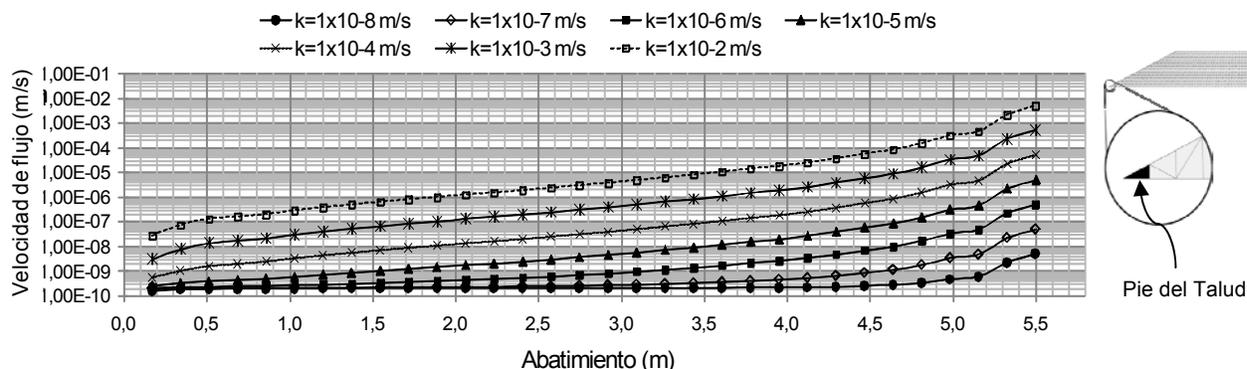


Figura 5.16 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas conductividades hidráulicas.

Con respecto al gradiente hidráulico máximo, éste se presenta cerca de la línea del nivel de agua en la cara del talud. En la Figura 5.17 se muestra el cambio del gradiente hidráulico máximo para cada conductividad hidráulica. Aunque el gradiente hidráulico es mayor durante el vaciado para conductividades hidráulicas bajas, éste alcanza el mismo valor para cada conductividad hidráulica cuando finaliza el vaciado. El gradiente máximo que se alcanza al final del vaciado rápido, es independiente de la conductividad hidráulica del material del bordo.

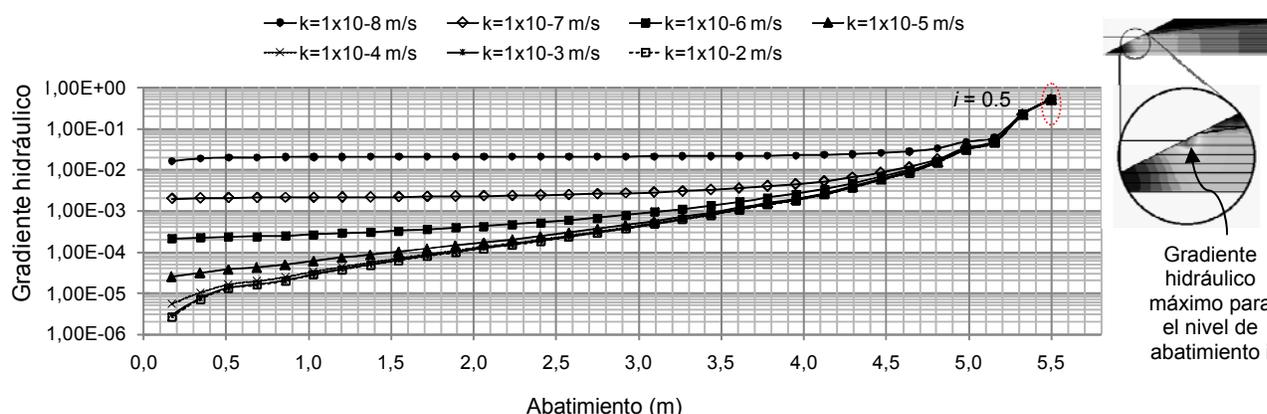


Figura 5.17 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintas conductividades hidráulicas.

b) Variación de la velocidad de vaciado

Para conocer la influencia de la velocidad de vaciado, se utilizó una conductividad hidráulica 1×10^{-5} m/s, un talud en proporción 2:1 y valores de velocidad de vaciado entre 1.1 m/d y 66 m/d que corresponden a 5 días y 2 horas de duración de vaciado respectivamente.

En las Figuras 5.18 y 5.19 se muestran las líneas de desaturación calculadas con los métodos ya mencionados. Se observa que para velocidades de vaciado altas, los valores de la altura H son mayores, generando una superficie de descarga libre mayor. Para el caso de las líneas obtenidas por medio del programa *Plaxflow*, las líneas correspondientes a velocidades de abatimiento pequeñas (1.1 m/d y 5.5 m/d) son similares. Sin embargo ambos métodos continúan conservando una gran similitud para cada velocidad de vaciado.

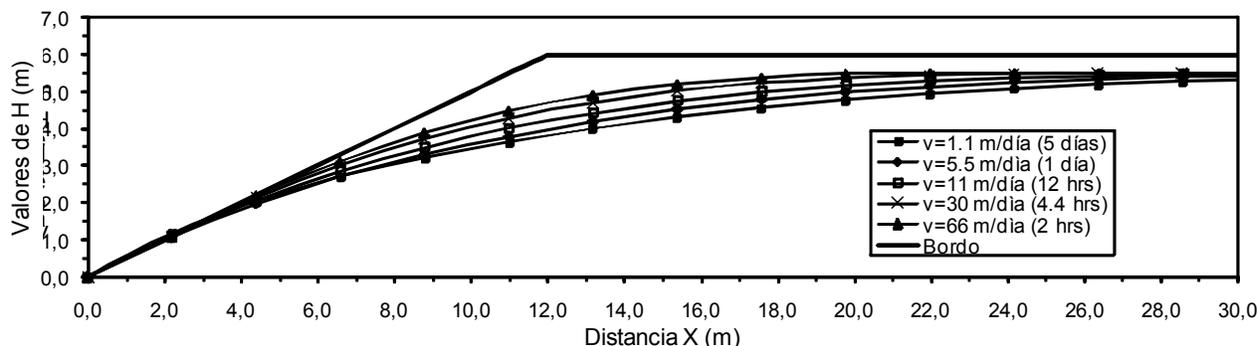


Figura 5.18 Variación de la línea de desaturación obtenida con la solución analítica de Alberro para diferentes velocidades de abatimiento al final del vaciado rápido.

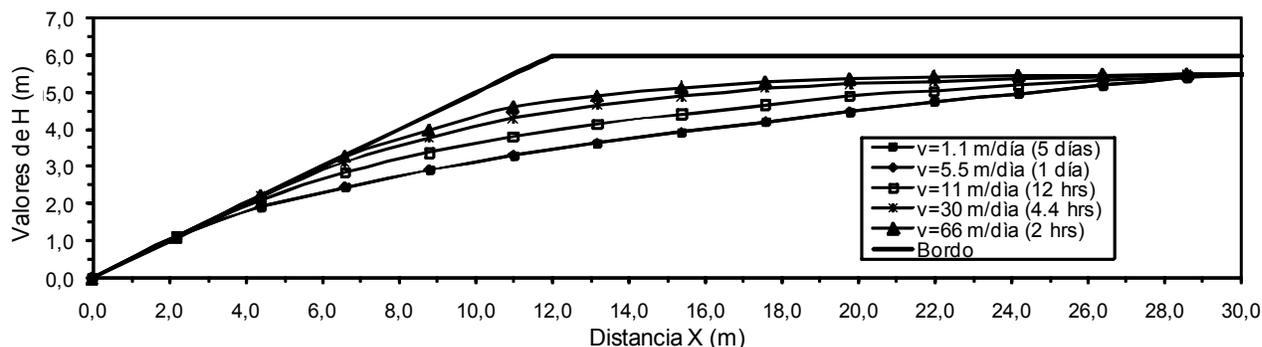


Figura 5.19 Variación de la línea de desaturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaflow*) para diferentes velocidades de abatimiento al final del vaciado rápido.

En la Figura 5.20 se muestran las velocidades de flujo al pie del talud, para este caso las velocidades de flujo al iniciar el vaciado son mayores para velocidades de abatimiento altas, mientras que para velocidades de abatimiento menores, las velocidades de flujo son bajas, sin embargo la velocidad de flujo al final del vaciado al pie del talud, es independiente de la velocidad de abatimiento.

En la Figura 5.21 se observa que para velocidades de abatimiento altas (66 m/d y 20 m/d) los gradientes máximos se alcanza durante etapas intermedias del vaciado, y no al final como sucede para velocidades menores. Estos gradientes máximos se producen en la cara del talud y dentro del cuerpo del bordo y puede provocar la falla parcial del bordo debido a que los gradientes pueden sobrepasar el gradiente hidráulico crítico cuando el material del bordo es impermeable.

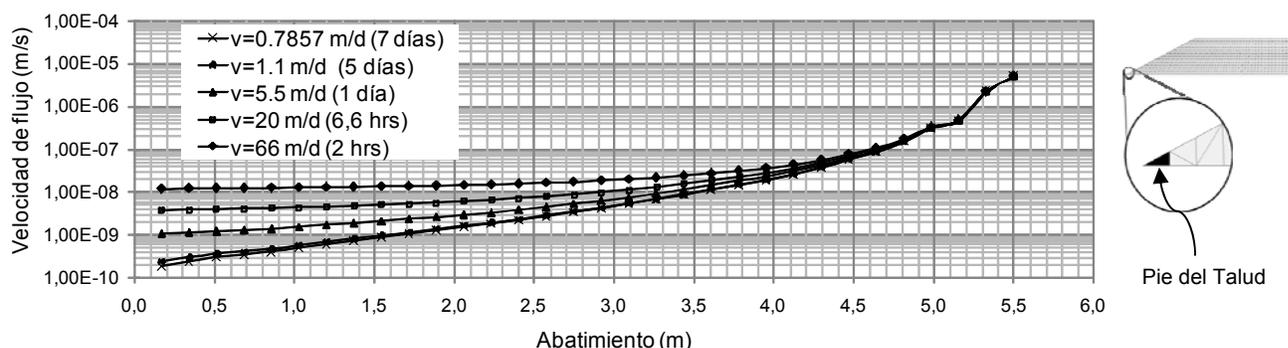


Figura 5.20 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas velocidades de vaciado.

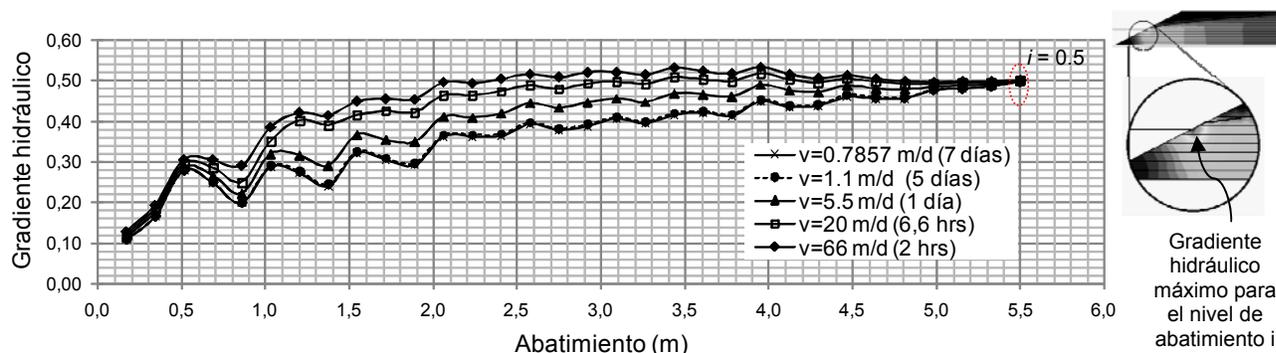


Figura 5.21 Variación del gradiente hidráulico máximo para las distintas velocidades de vaciado.

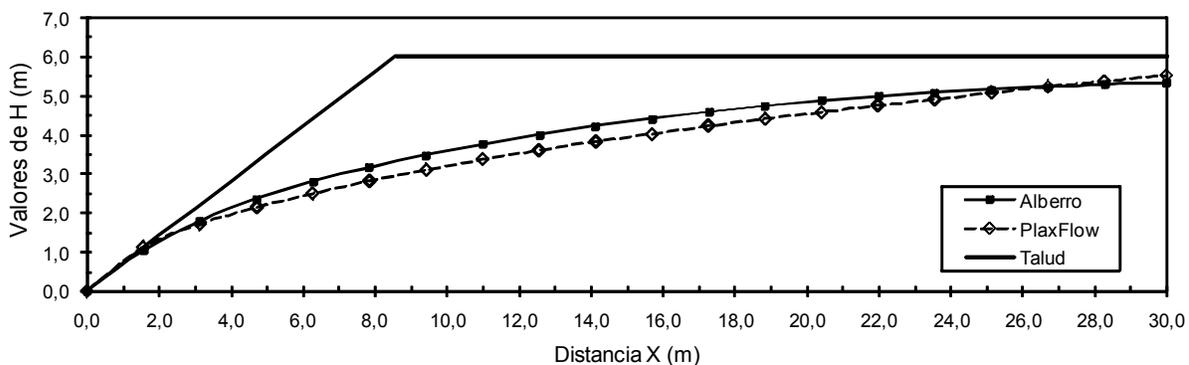
c) Variación del ángulo del talud

Para finalizar el estudio paramétrico para el vaciado rápido, se cambió el ángulo de inclinación del talud entre los 15° y 50° utilizando una conductividad hidráulica del material de 1×10^{-5} m/s y una velocidad de vaciado de 1.1 m/d.

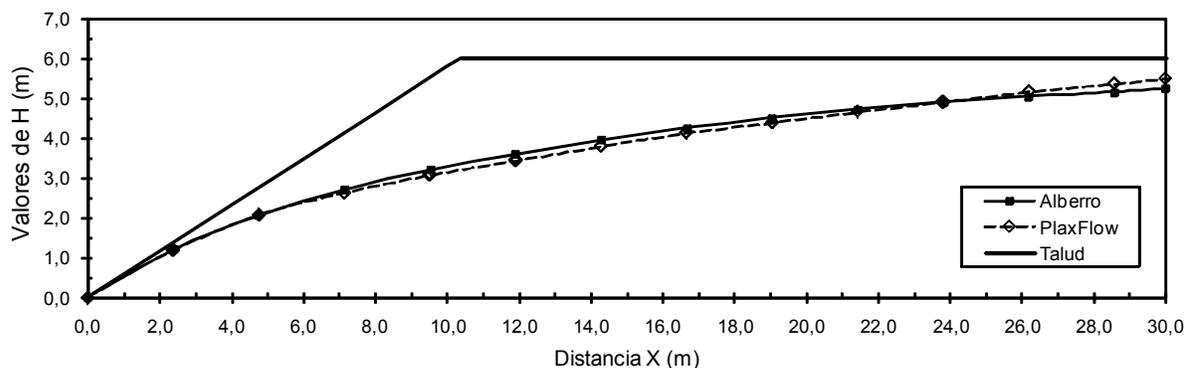
En la Figura 5.22 se observa la similitud que guardan las líneas de desaturación calculadas con los dos diferentes métodos de solución. También se aprecia que la línea de descarga libre aumenta conforme en ángulo disminuye.

Cuando se comparan las velocidades de flujo al pie de cada uno de los taludes (Figura 5.23), se observa que para los ángulos de mayor pendiente, las velocidades de flujo son mayores, condición que favorece la inestabilidad del borde.

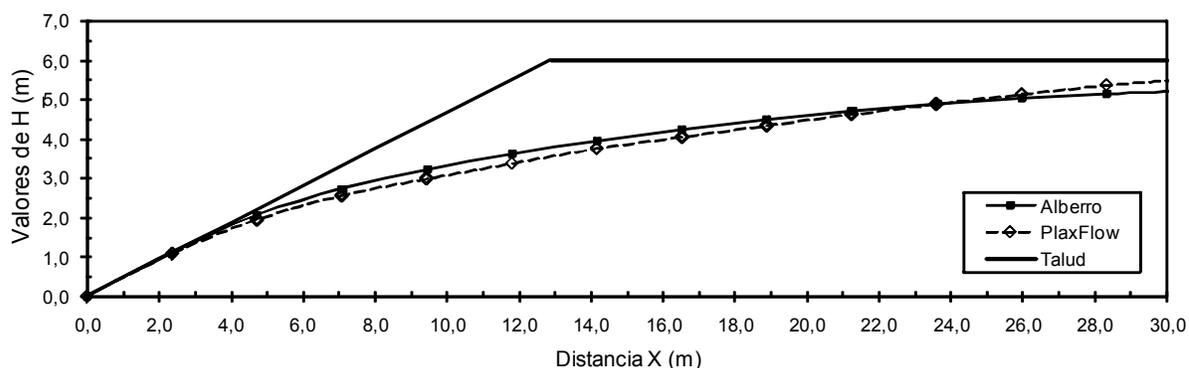
En la figura 5.24 se observa que los gradientes máximos se alcanzan cuando finaliza el vaciado y que el valor del gradiente hidráulico aumenta con la pendiente, Lo anterior indica que cuando la pendiente de un talud es muy grande, es más sencillo alcanzar el valor del gradiente hidráulico crítico que favorece la inestabilidad del talud del borde.



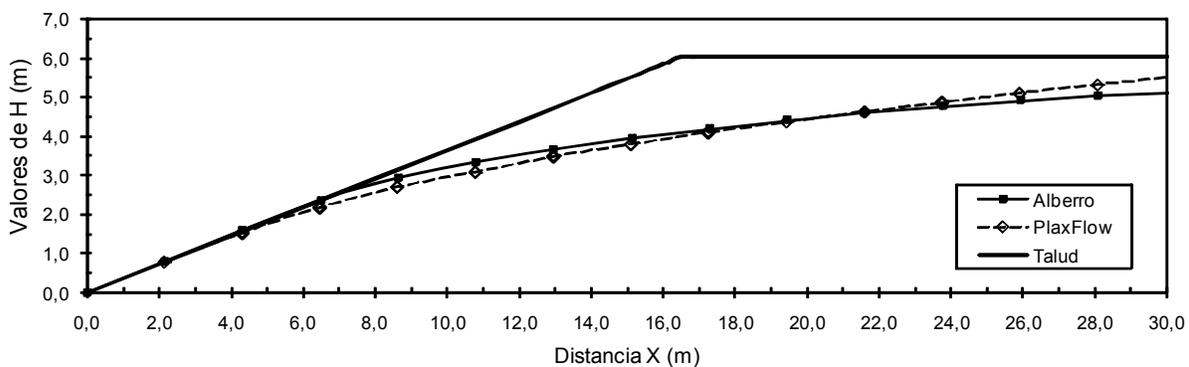
a) Inclinación del talud 35 °



b) Inclinación del talud 30 °



c) Inclinación del talud 25 °



d) Inclinación del talud 20 °

Figura. 5.22 Variación de la línea de saturación obtenida con la solución numérica y la solución analítica para diferentes ángulos del talud al final del vaciado rápido.

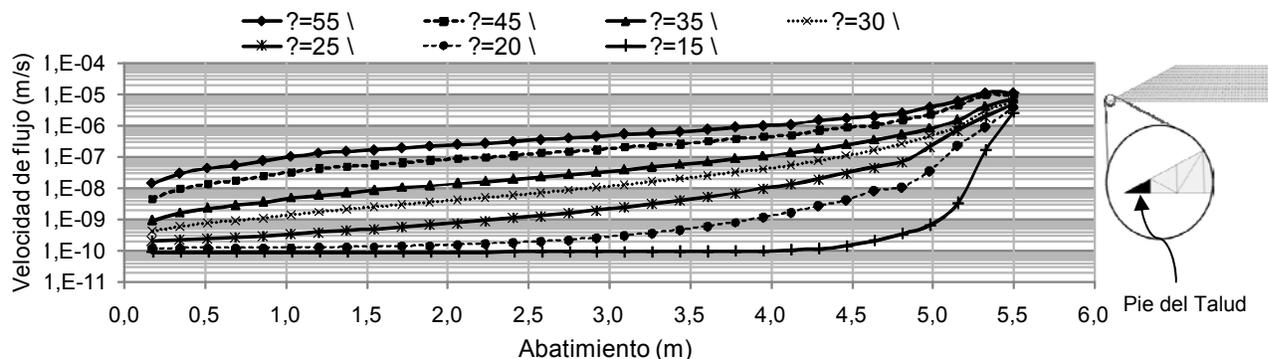


Figura.5.23 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para diferentes ángulos de inclinación del talud durante el vaciado rápido.

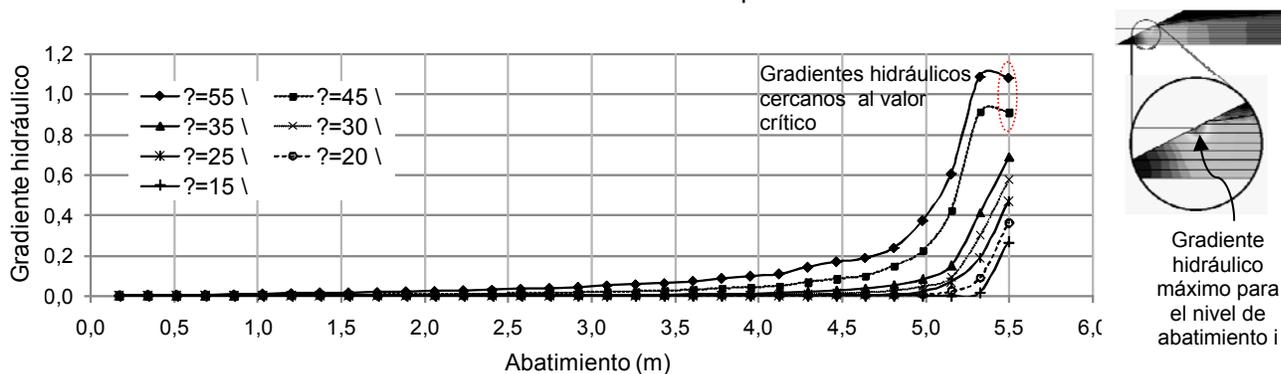


Figura.5.24 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintos ángulos del talud durante el vaciado rápido.

5.1.1.4 Colocación de drenes

Para finalizar el análisis del vaciado rápido se modelaron diferentes geometrías de drenes con el fin de conocer el comportamiento de los gradientes hidráulicos máximos al final del vaciado y el comportamiento de los vectores de velocidad dentro del cuerpo del bordo

La geometría de los drenes son las siguientes:

- a) Un dren horizontal a la mitad del bordo
- b) Un dren horizontal en la base del bordo
- c) Un dren diagonal a la mitad del bordo
- d) Dos drenes horizontales colocados uno en la base y otro a la mitad del bordo
- e) Un dren que recorre la cara del talud y la base del bordo
- f) Un dren dentro del cuerpo del bordo, con una sección horizontal y una vertical que se encuentra a la mitad del bordo.

En la Figura 5.25 se observa la geometría de cada uno de los drenes de una forma más detallada

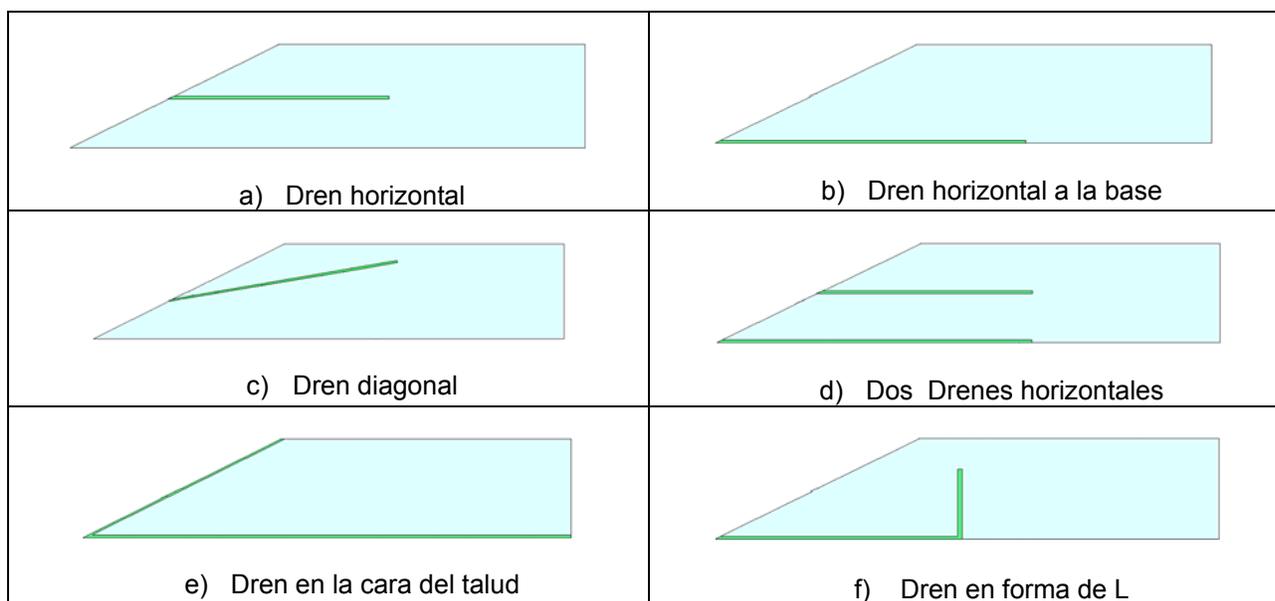


Figura.5.25 Geometría de los drenes utilizados en el análisis.

En la Figura 5.26 se muestran los gradientes hidráulicos al pie del talud para cada una de las geometrías de los bordos utilizadas al finalizar el vaciado rápido. Los drenes horizontales colocados en la base del bordo mostraron mejores resultados al disminuir el valor del gradiente hidráulico, así como la disminución de las velocidades de flujo en el cuerpo del bordo como se observa en cada uno de los casos en la Figura 5.27. En mejor resultado fue al utilizar dos drenes horizontales que demostraron disminuir la velocidad de flujo en el cuerpo de todo el bordo durante el vaciado y un gradiente máximo al pie del talud de 0.24.

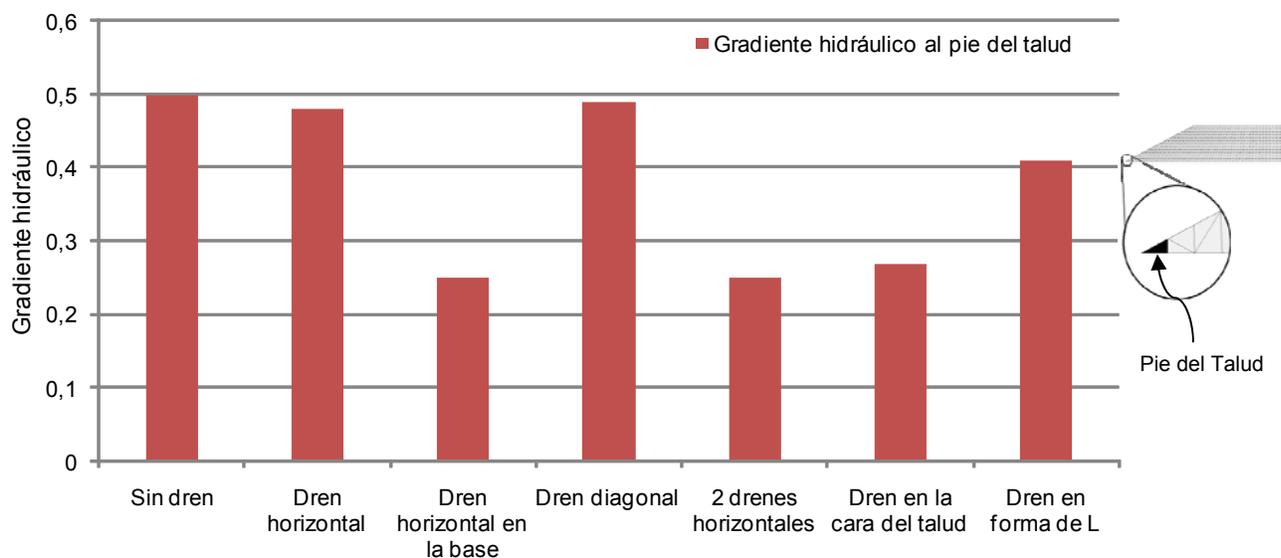


Figura.5.26 Gradientes hidráulicos al pie del talud al final de vaciado rápido.

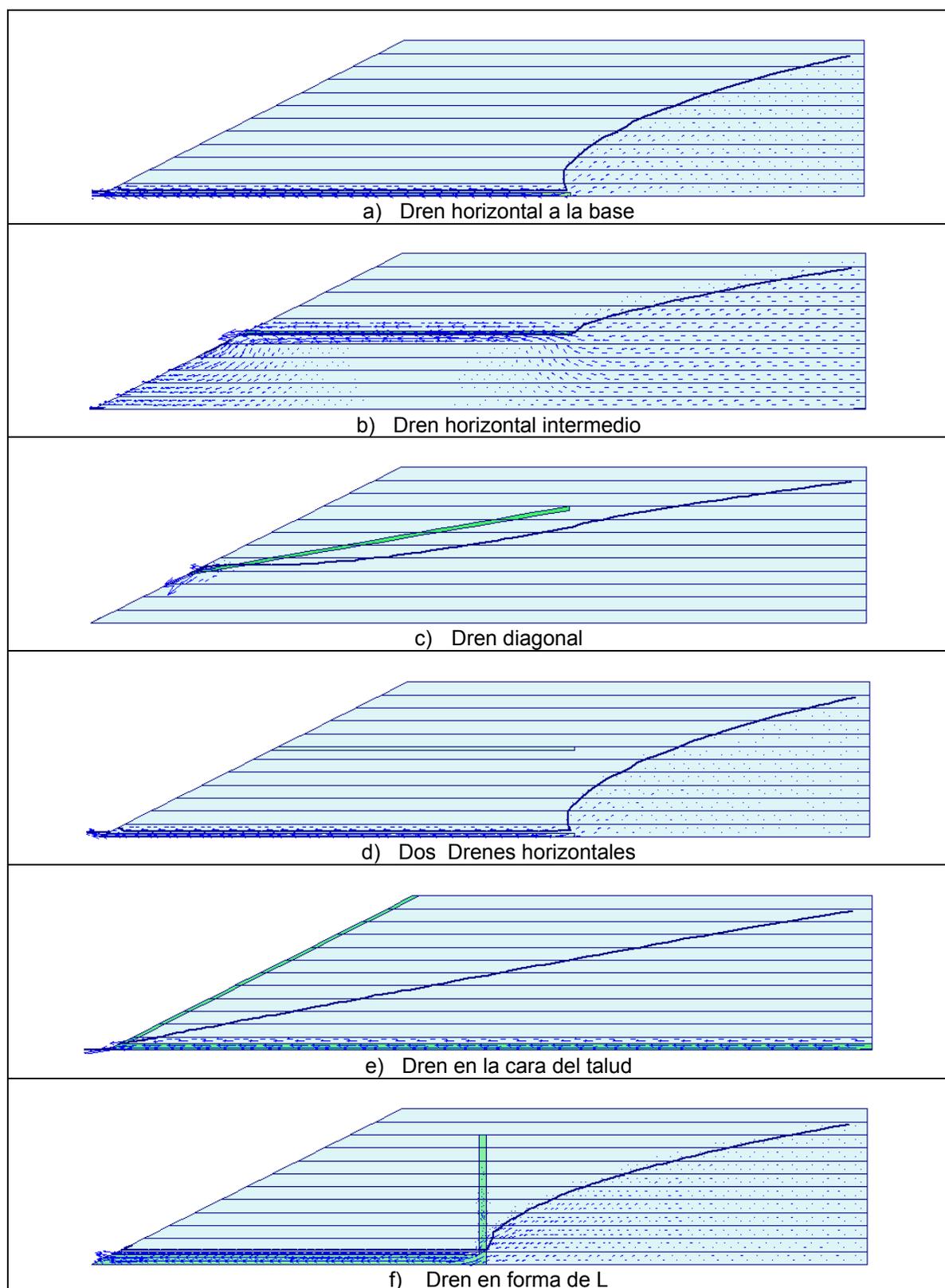


Figura 5.27 Comparativo de los vectores de velocidad para los distintos drenes al final del vaciado rápido.

5.1.2 Flujo transitorio durante el llenado rápido

Para el análisis de flujo transitorio durante el llenado rápido se utilizó una velocidad de incremento del nivel de agua de 1.1 m/d. El incremento máximo para el nivel del estudio fue de 5.5 metros alcanzado después de 5 días de llenado. El nivel en la cara de talud aumentará desde cero metros, hasta el nivel máximo; mientras que en el extremo derecho del bordo el nivel de agua se mantiene constante en 2 metros. Las condiciones para realizar la modelación se muestran en la Figura 5.28.

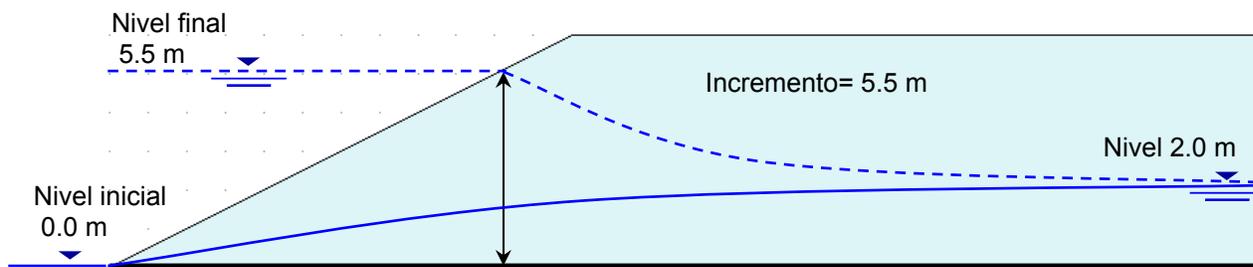


Figura 5.28 Condiciones iniciales y de frontera para el llenado rápido.

A continuación se muestran los resultados de realizar el análisis de flujo transitorio cuando sucede el llenado rápido.

5.1.2.1 Flujo transitorio sin considerar la aportación del agua de lluvia

En la Figura 5.29 se muestra el incremento del grado de saturación dentro del cuerpo del bordo debido al incremento del nivel de agua. Puede observarse que la línea *freática* o línea de *superficie* separa al material saturado del material no saturado, como se expuso también durante el vaciado rápido. En adelante la curva de superficie que se genera durante el vaciado rápido se denominará línea de saturación. Para este caso, la curva de saturación durante el flujo transitorio puede ser muy diferente de la determinada por los análisis clásicos de zonas sólo saturadas (Freeze, 1971).

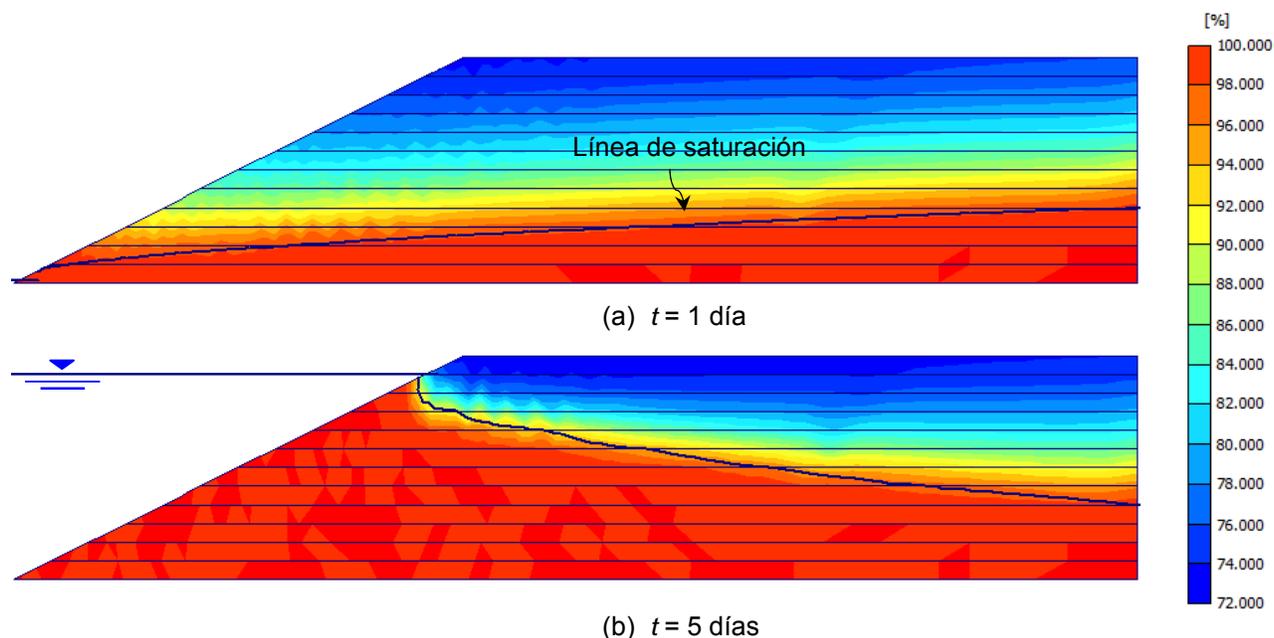


Figura 5.29 Variación del grado de saturación (en %) para el inicio y final del llenado rápido.

En la Figura 5.30 se muestran las líneas de saturación y las líneas equipotenciales obtenidas para tres distintas etapas del llenado. Se observa que durante el fenómeno de llenado rápido las líneas equipotenciales tampoco cumplen con la hipótesis de su cuasi-verticalidad propuesta por Poluvarinova. Sin embargo, la condición anterior no es causa para que las curvas obtenidas a través del método analítico y el método numérico no guarden una gran concordancia entre sí. (Figuras 31 y 32).

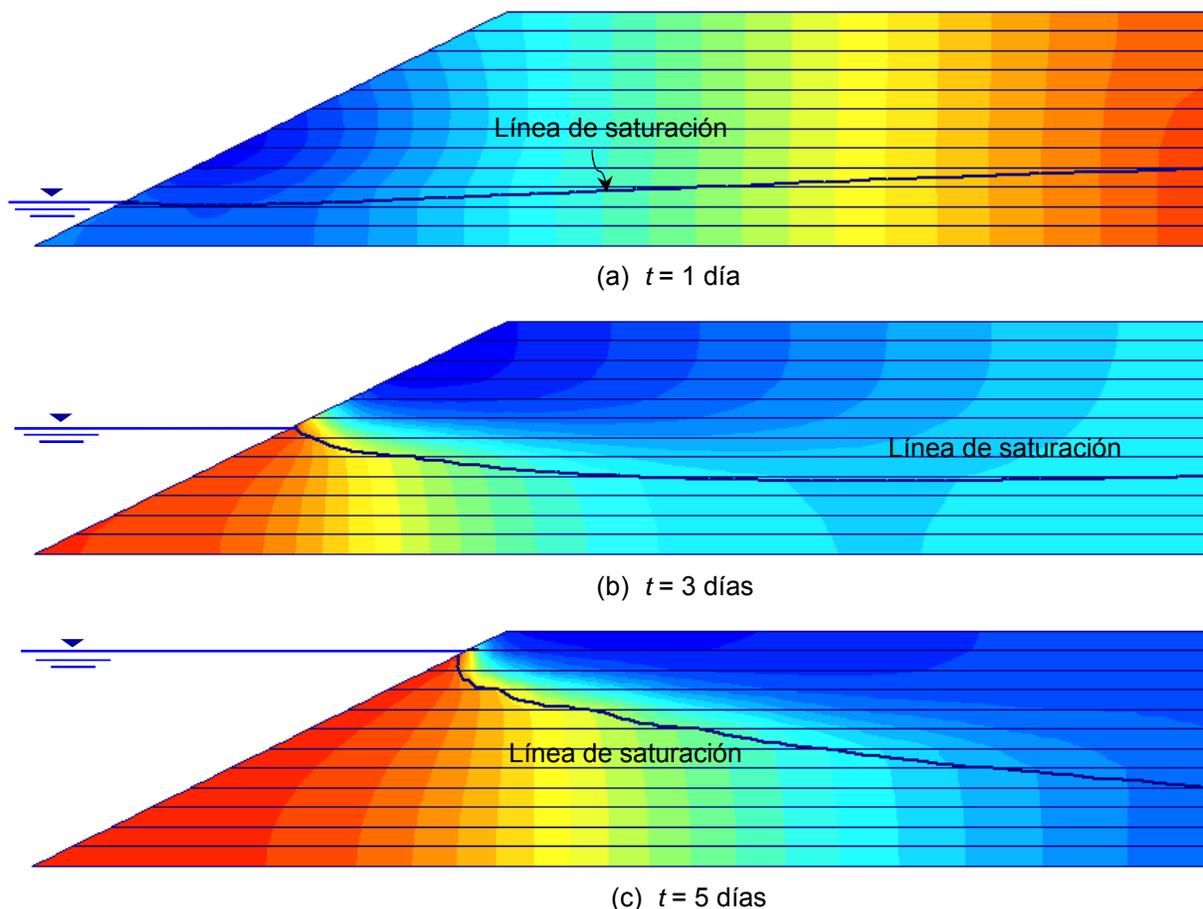


Figura 5.30 Variación de las líneas equipotenciales para diferentes tiempos de llenado.

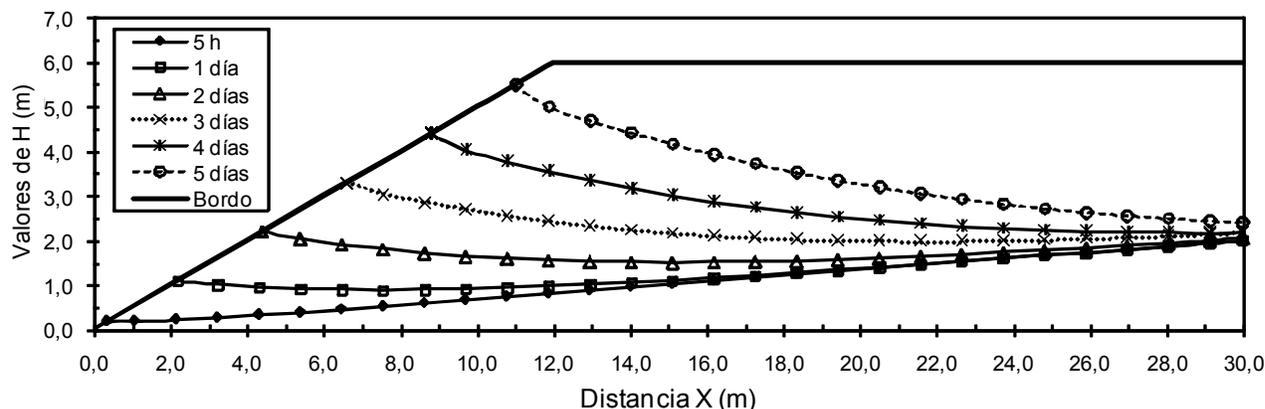


Figura 5.31 Variación de la línea de saturación obtenida con el método analítico de Alberro para diferentes instantes durante el llenado rápido.

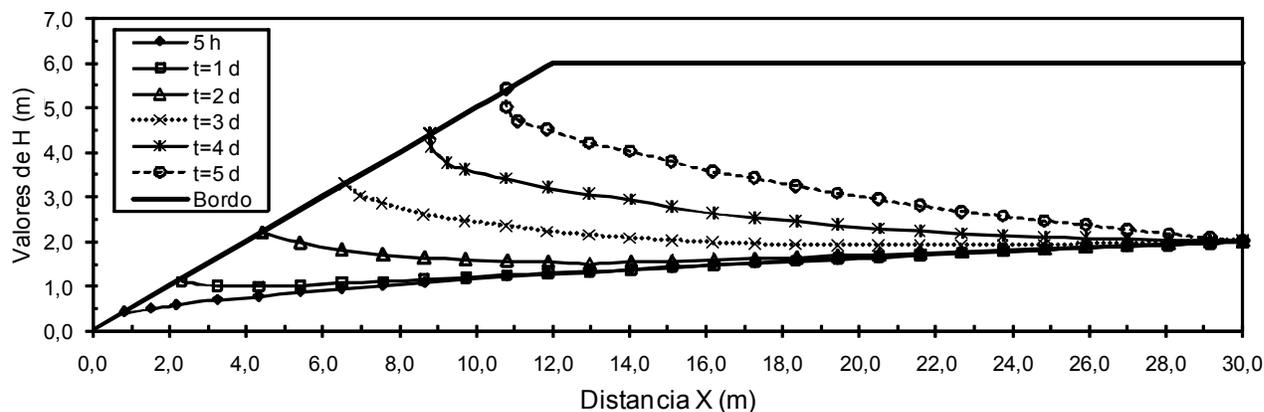


Figura 5.32 Variación de la línea de saturación obtenida con el método de elemento finito (*PlaxFlow*) para diferentes instantes durante el llenado rápido.

La Figura 5.33 muestra distintas etapas durante el llenado, donde se observa la existencia de velocidades máximas cerca de la cara del talud, por abajo de la línea de saturación. La velocidad máxima de flujo se alcanza al finalizar el llenado ($V_{max} = 6.65 \times 10^{-6}$ m/s). En la Figura 5.34 se muestra la variación de la velocidad máxima cercana a la cara del talud durante todo el llenado rápido. Esta velocidad puede ocasionar erosión en la cara del talud, así como la tubificación local del material dependiendo de las características del bordo como se mostrará más adelante.

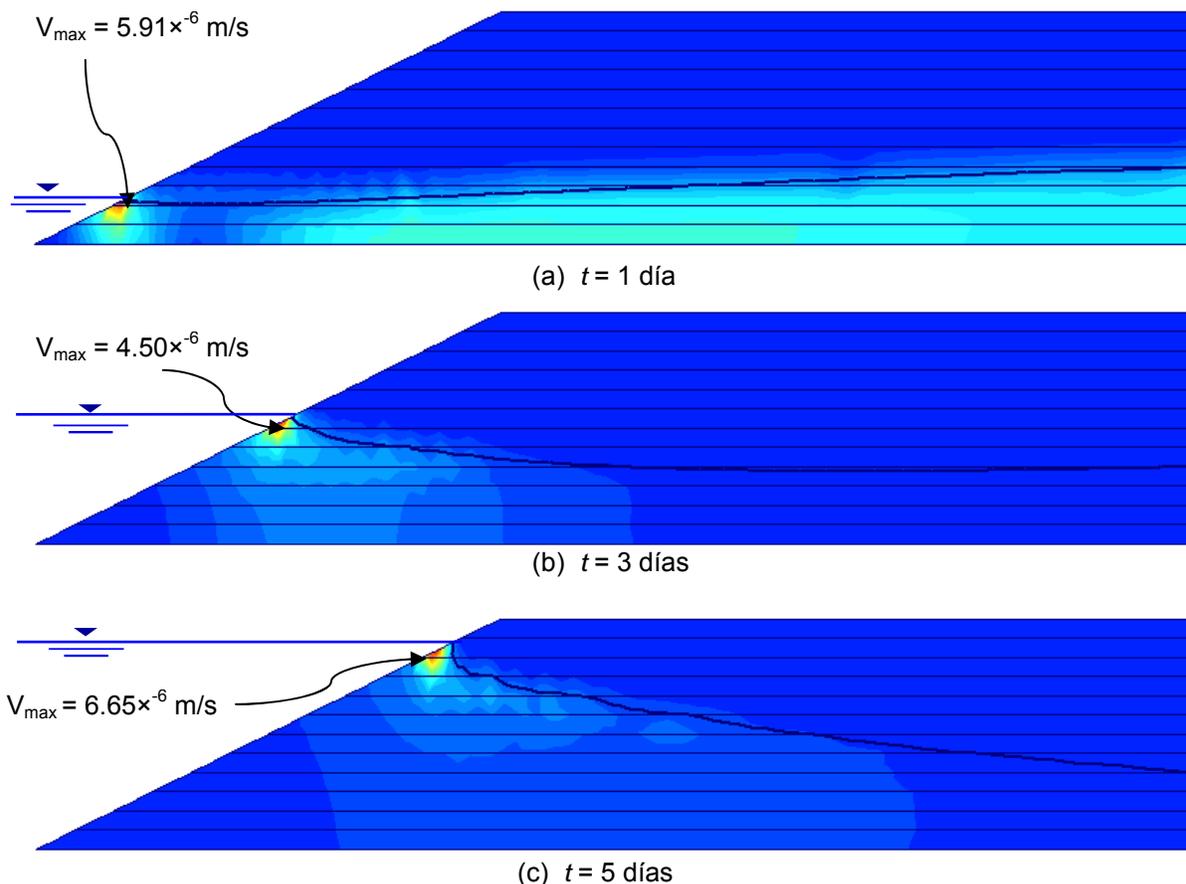


Figura 5.33 Variación de la magnitud de la velocidad de flujo para diferentes tiempos de llenado.

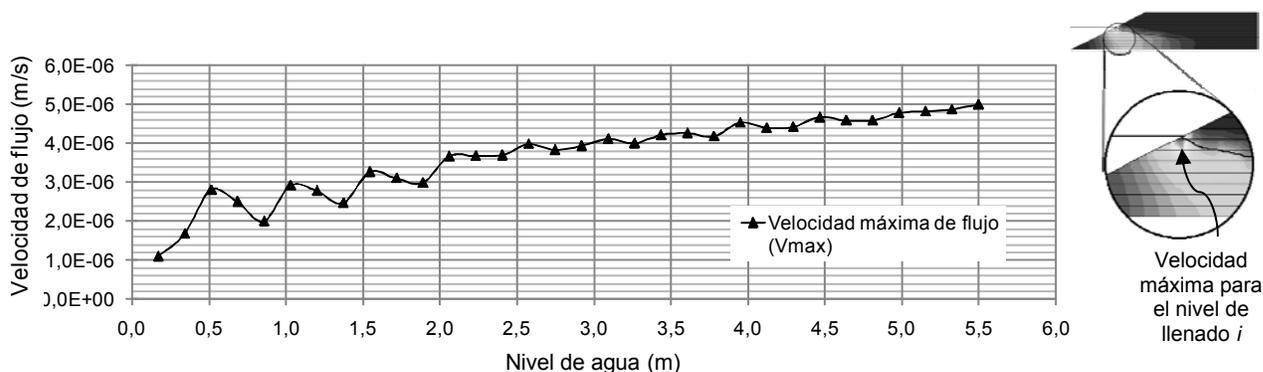


Figura 5.34 Variación de la magnitud de la velocidad máxima de flujo para diferentes tiempos de llenado.

En la figura 5.35 se muestran los vectores de velocidad obtenidos para las tres etapas anteriores. Se observa que los vectores de velocidad en algunas zonas cerca de la cara del talud son perpendiculares a la línea de saturación. Con ello es más claro demostrar que las líneas que se producen durante la condición de flujo transitorio se tratan de líneas que dividen la salida del agua de la zona saturada a la no saturada dentro del cuerpo del bordo (López-Acosta y Auvinet, 2009), y no una línea de flujo como sucede en el caso de flujo establecido.

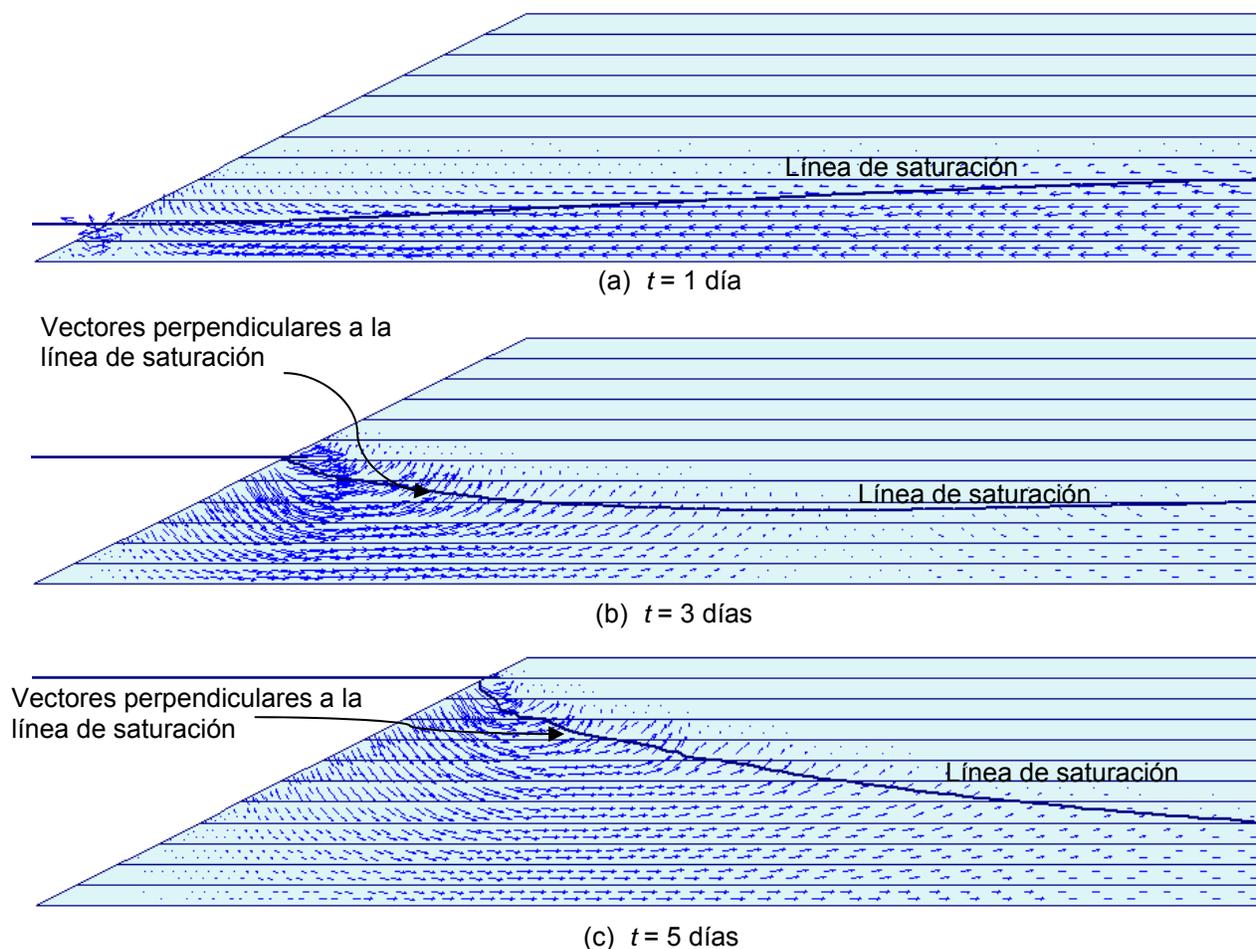


Figura 5.35 Vectores de velocidad para tres diferentes tiempos de llenado rápido.

5.1.2.2 Flujo transitorio considerando la aportación del agua de lluvia

Para realizar el análisis se tomó en cuenta un valor de precipitación de 80 mm/día, correspondiente al valor promedio de las lluvias ocurridas en 2007 durante los meses de octubre y noviembre. Para este caso no se presentan líneas de saturación por que el material se encuentra saturado debido a la aportación de agua de lluvia (Figura 5.36).

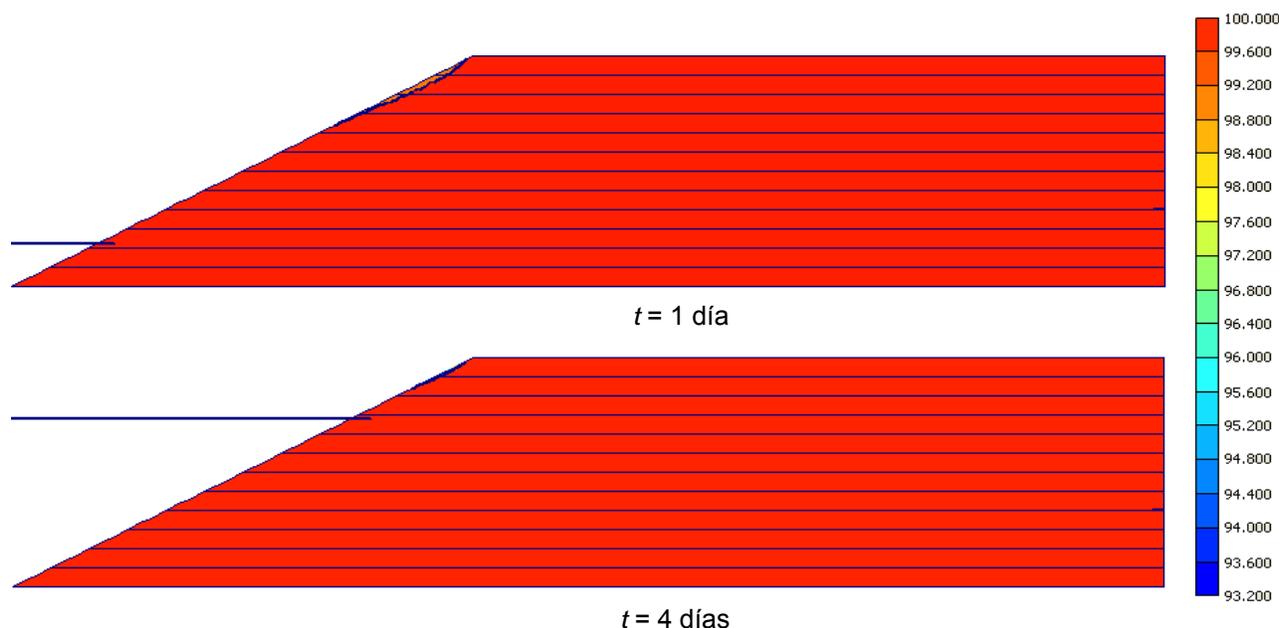


Figura 5.36 Variación del grado de saturación cuando se considera la aportación del agua de lluvia.

Para el llenado rápido, la aportación de agua de lluvia modifica completamente la dirección del flujo, además de la magnitud del gasto y las velocidades cerca de la cara del talud. Cuando no es considerada el agua de lluvia, el gasto disminuye y la velocidad aumenta con el tiempo, y la dirección de flujo es en dirección del bordo, sin embargo, cuando se toma en cuenta la aportación de agua de lluvia, la dirección del flujo se invierte y se dirige fuera del cuerpo del bordo debido a que la carga hidráulica dentro del bordo es mayor. En la Figura 5.37 se observa el cambio en la magnitud del gasto para ambos casos, mientras que en la Figura 5.38 se nota el cambio en la dirección de los vectores de velocidad durante el llenado rápido.

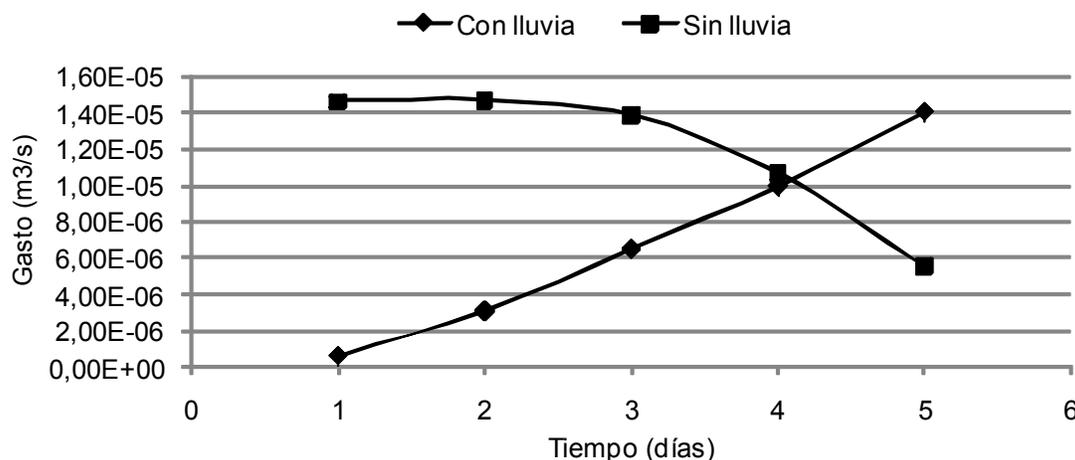


Figura 5.37 Magnitud del gasto de salida en la cara del talud para el llenado rápido.

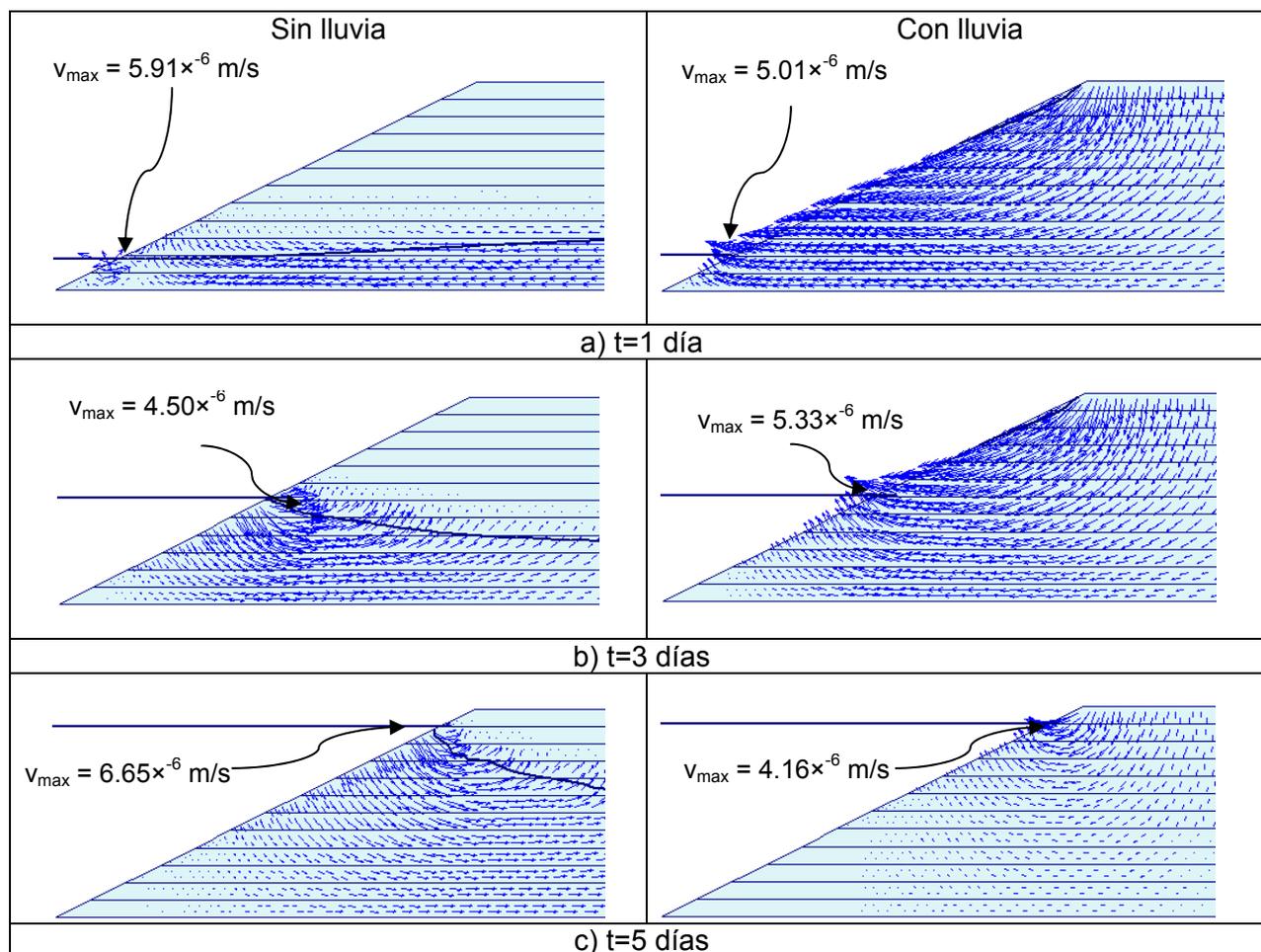


Figura 5.38 Comparación de los vectores de velocidad obtenidos para el llenado rápido considerando la aportación del agua de lluvia.

5.1.2.3 Estudio paramétrico para el llenado rápido

Para realizar el análisis se tomaron en cuenta los parámetros más significativos que afectan a la velocidad de flujo y los gradientes hidráulicos generados dentro del cuerpo del bordo (conductividad hidráulica, velocidad de vaciado y ángulo del talud). Para cada caso se calculan las líneas de saturación con los métodos analítico y numérico y se estudia el comportamiento de las velocidades de flujo y gradientes en puntos de interés dentro del bordo.

a) Variación de la conductividad hidráulica

En el caso en donde se varió el valor de la conductividad hidráulica se utilizaron valores entre 1×10^{-2} m/s y 1×10^{-8} m/s manteniendo constante la velocidad de llenado en 1.1 m/día y el valor del ángulo del talud en proporción 2:1. En la figura 5.32 y 5.33 se muestran las líneas de saturación obtenidas con ambos métodos para algunas de las conductividades hidráulicas al final del llenado. Se observa que las líneas obtenidas con el método de elemento finito, se encuentran más cerca del talud cuando las conductividades hidráulicas son muy bajas (conductividades hidráulicas entre 1×10^{-8} m/s y 1×10^{-6} m/s), esto es debido a que en condiciones de conductividad hidráulica baja, el suelo tarda más en saturarse, ya que la tasa de crecimiento de la zona saturada es altamente dependiente de las propiedades de los suelos no saturados y del contenido inicial de humedad (Freeze, 1971). Mientras que las curvas de saturación obtenidas con el método analítico muestra una discontinuidad para estas mismas conductividades hidráulicas, debido a que el método se ve restringido por las condiciones de frontera de la ecuación diferencial que omiten el cálculo de valores para la línea de saturación por debajo del punto del cruce entre la cara del talud y el nivel de agua (Figura 5.39).

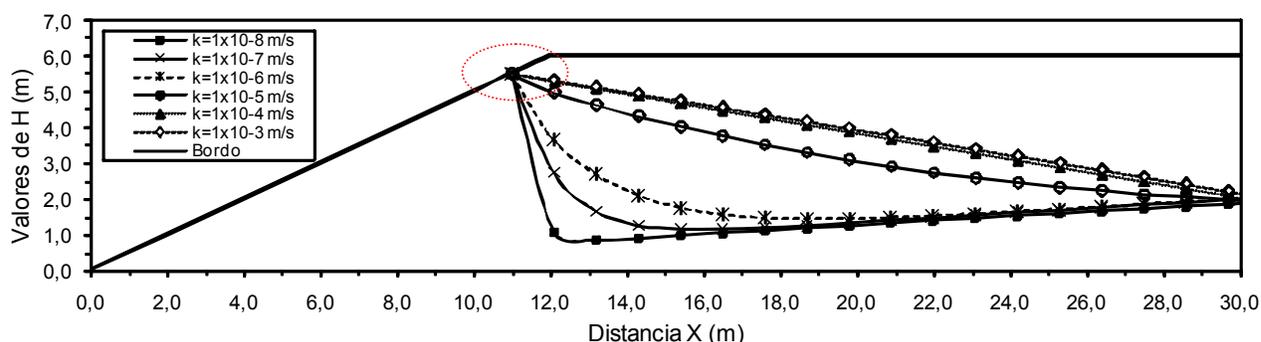


Figura 5.39. Variación de la superficie libre obtenida con el método analítico de Alberro para diferentes conductividades hidráulicas al final del llenado rápido.

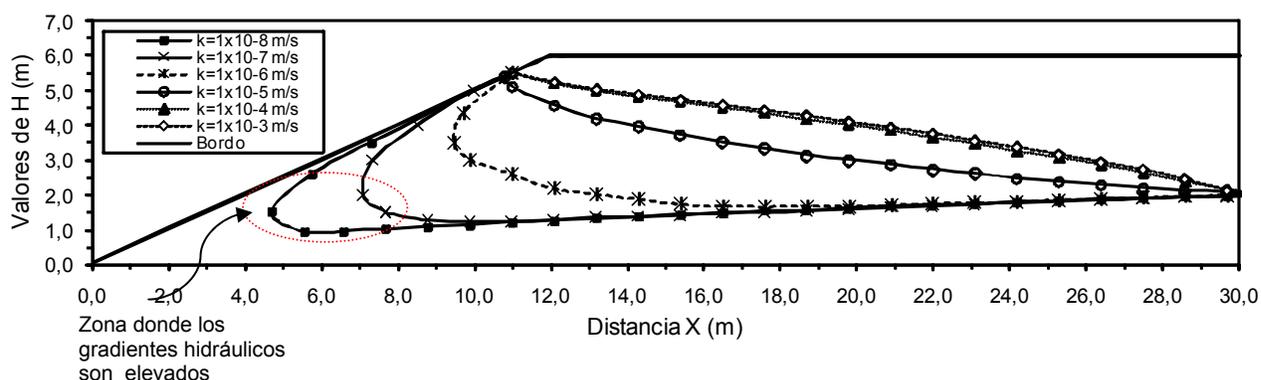


Figura 5.40. Variación de la superficie libre obtenida con el método de elemento finito (*Plafow*) para diferentes conductividades hidráulicas al final del llenado rápido.

Para la velocidad de flujo al pie del talud, ésta disminuye para todas las conductividades hidráulicas durante el llenado, sin embargo al final del fenómeno no guarda una relación lineal como en el caso de vaciado rápido.

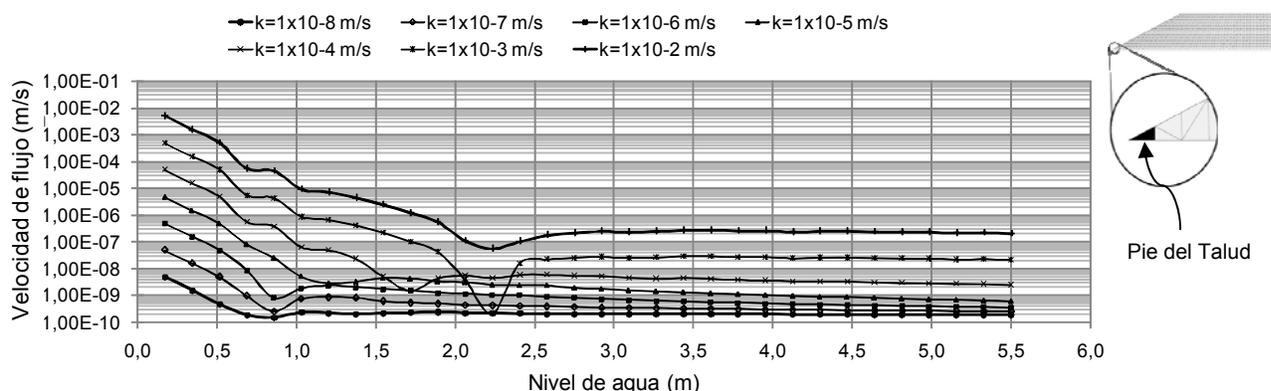


Figura 5.41 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas conductividades hidráulicas durante el llenado rápido.

En lo que se refiere a los gradientes hidráulicos máximos (Figura 5.41), éstos aumentan considerablemente cuando se utilizan conductividades hidráulicas muy bajas (entre 1×10^{-6} m/s y 1×10^{-8} m/s) y se presentan en el cuerpo del bordo, cerca de la línea de saturación (Figura 5.40), lo que ocasiona problemas de inestabilidad al verse rebasado el gradiente hidráulico crítico en estas zonas ($i_{erc} \approx 1$). Lo anterior demuestra que materiales muy impermeables no resultan ser la solución para controlar la infiltración dentro del cuerpo del bordo (Figura 5.42).

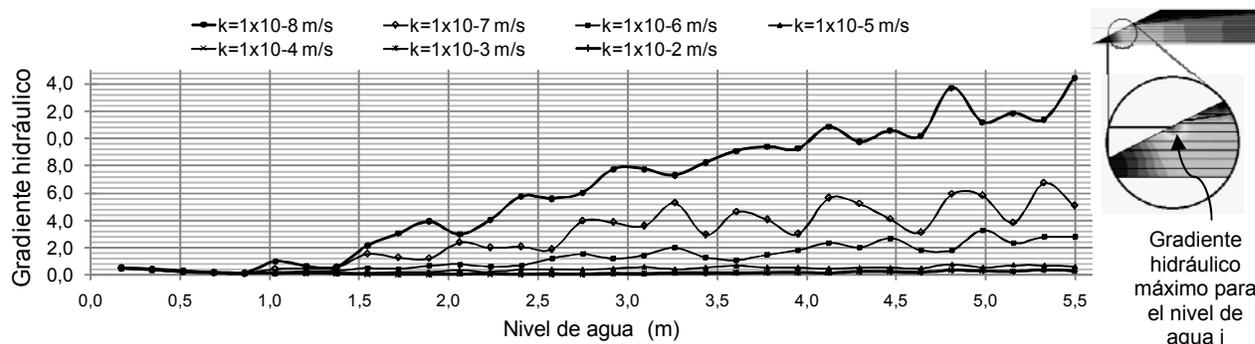


Figura 5.42 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintas conductividades hidráulicas durante el llenado rápido.

b) Variación de la velocidad de llenado

Para conocer la influencia de la velocidad de llenado, se utilizó una conductividad hidráulica de 1×10^{-5} m/s, un talud en proporción 2:1 y valores de velocidad de vaciado entre 0.78 m/d y 66 m/d que corresponden a 7 días y 2 horas de duración de llenado respectivamente.

Para las curvas de saturación, éstas guardan una gran similitud para velocidades de llenado bajas (entre 0.78 y 5.5 días) pero a medida que la velocidad de llenado aumenta, las curvas calculadas con el método analítico muestran la misma discontinuidad presente durante el aumento de conductividades hidráulicas. El aumento de la velocidad de llenado también afecta la velocidad con que el material del cuerpo del bordo se satura, condición que se observa en las curvas de saturación calculadas con el método de elemento finito.

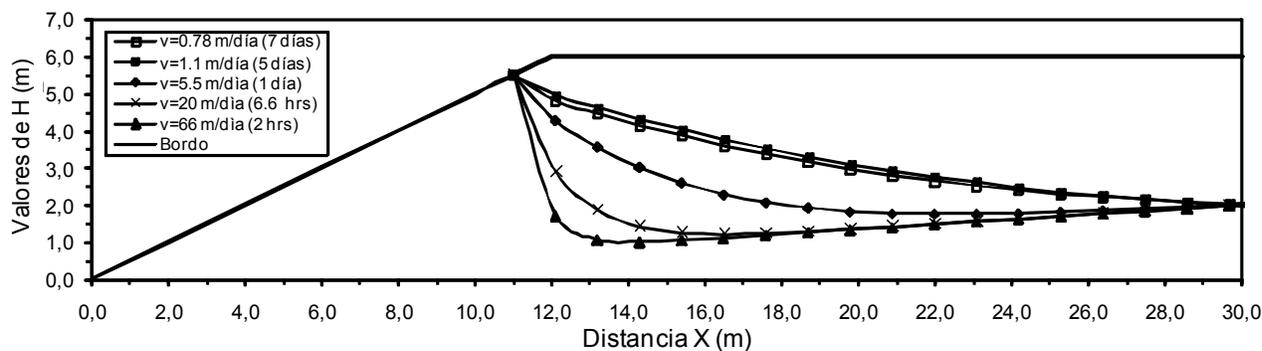


Figura 5.43 Variación de la línea de saturación obtenida con el método analítico de Alberro para diferentes velocidades de incremento del nivel de agua al final del llenado rápido.

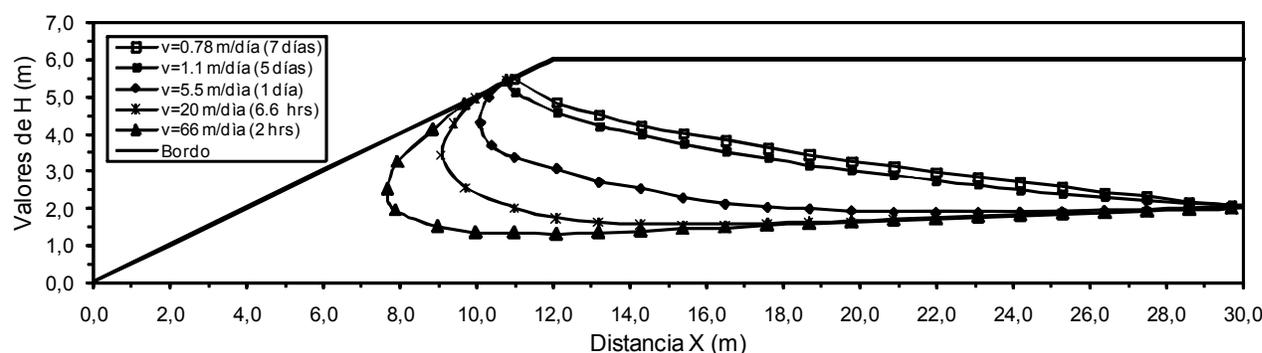


Figura 5.44. Variación de la línea de saturación obtenida con el método de elemento finito (*Plaxflow*) para diferentes velocidades de incremento del nivel de agua al final del llenado rápido.

En el caso de la velocidad de flujo al pie del talud, ésta disminuye conforme sucede el llenado, las velocidades de flujo más altas se presentan para las velocidades de llenado altas (66 y 20 m/d), sin embargo, la velocidad de flujo al inicio del llenado es la de mayor valor y es la misma para todos los casos.

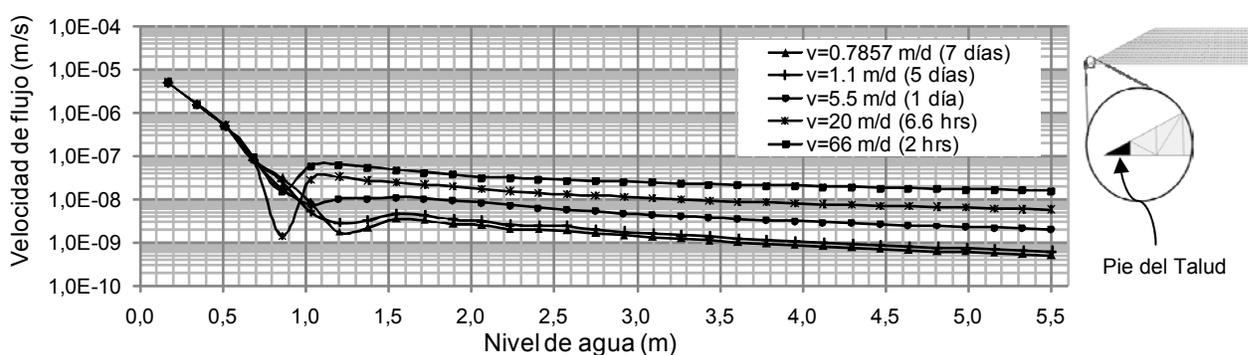


Figura 5.45 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas velocidades de llenado.

En lo que se refiere al valor del gradiente hidráulico máximo a lo largo de todo el llenado, éste supera el valor del gradiente crítico cuando la velocidad de llenado es mayor a 5.5 m/d (Figura 5.46), lo que puede provocar la falla total o parcial del talud.

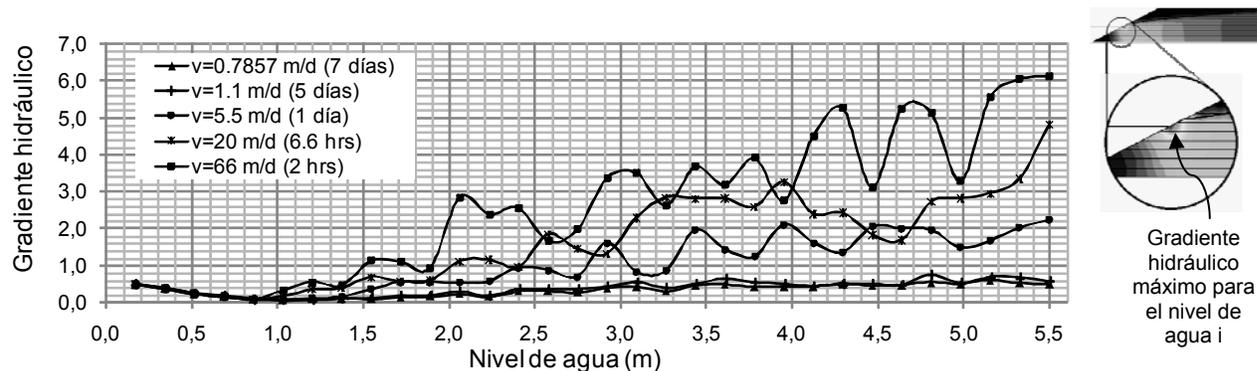


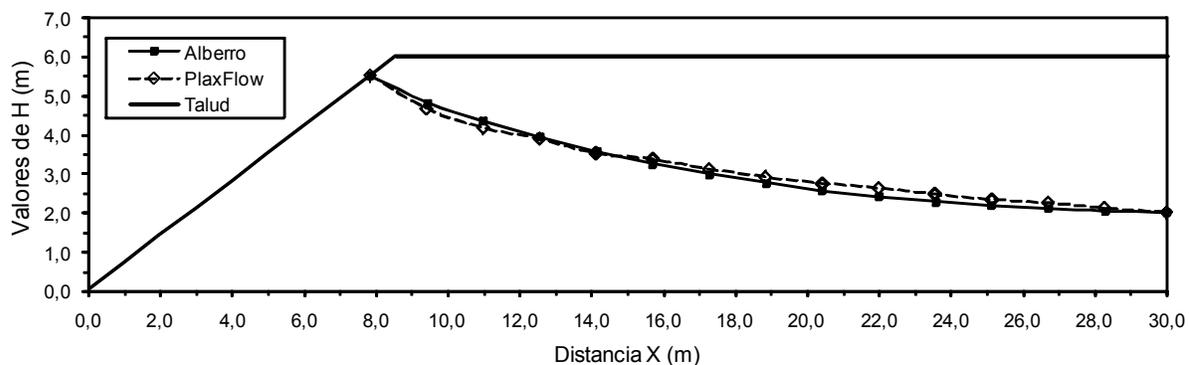
Figura 5.46 Variación del gradiente hidráulico máximo para distintas velocidades de llenado.

c) Variación del ángulo del talud

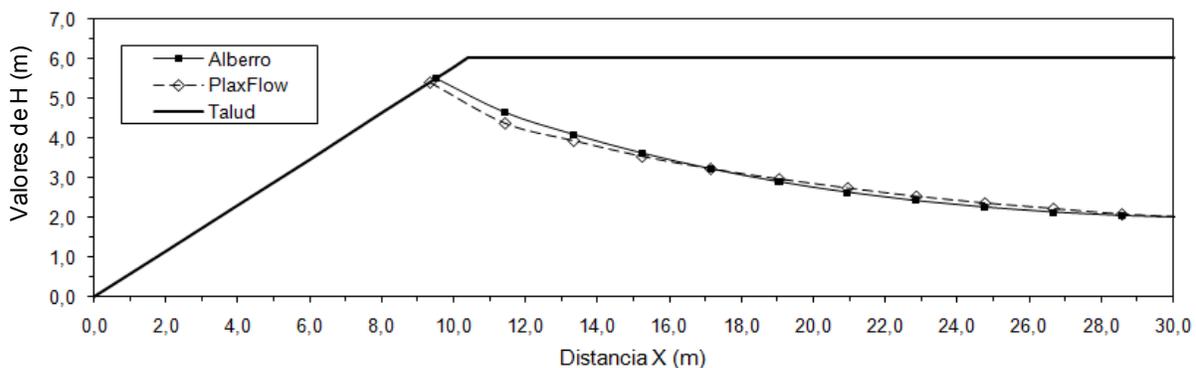
Para finalizar el estudio paramétrico para el llenado rápido, se hizo variar el ángulo del talud entre los 15° y 40° utilizando una conductividad hidráulica de 1×10^{-5} m/s y una velocidad de vaciado de 1.1 m/d.

En la Figura 5.47 se realiza el comparativo entre los dos métodos para distintos ángulos de inclinación del talud. Se observa una enorme coincidencia entre ambos métodos en todos los casos.

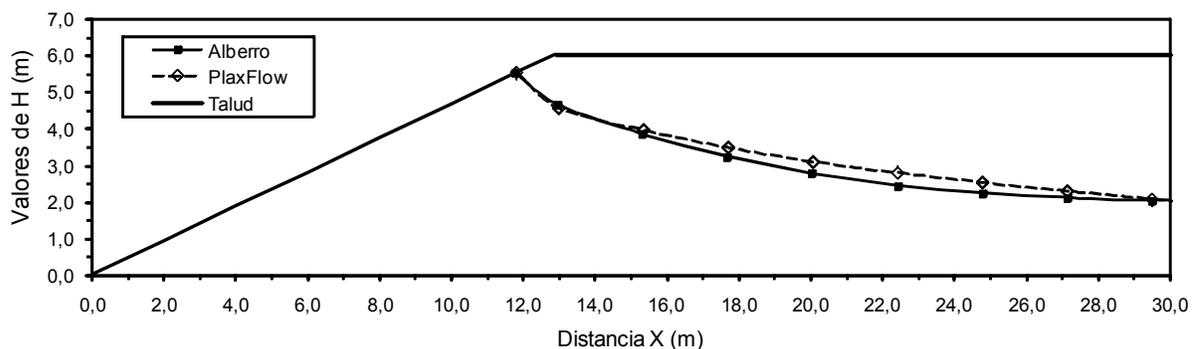
Para el caso de la velocidad de flujo al pie de cada uno de los taludes (Figura 5.48) la velocidad aumenta conforme el ángulo del talud es más vertical. Con ello se demuestra que los taludes con grandes pendientes presentan problemas de estabilidad ocasionados por la presencia de velocidades de flujo mayores. La velocidad de flujo aumenta por la disminución del área de descarga cuando se tienen taludes de pendientes grandes.



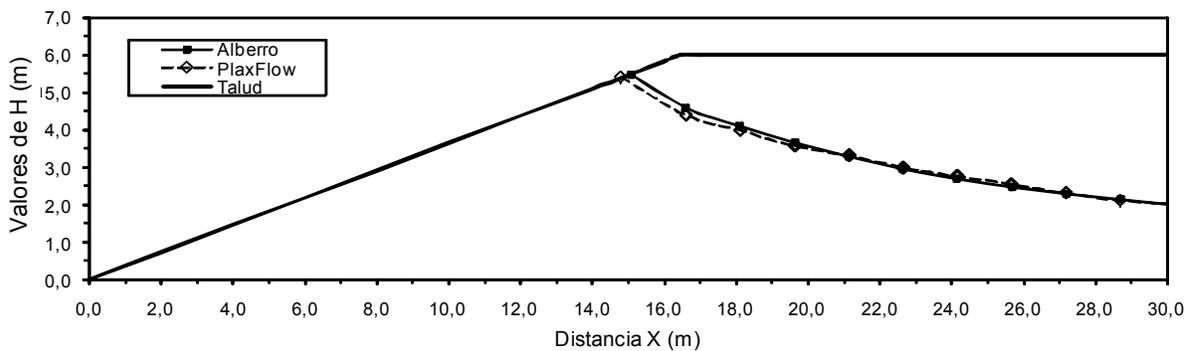
a) Inclinación del talud 35 °



b) Inclinación del talud 30 °



c) Inclinación del talud 25 °



d) Inclinación del talud 20 °

Figura 5.47 Variación de línea de saturación con la solución numérica y la solución analítica para diferentes ángulos del talud al final del llenado rápido.

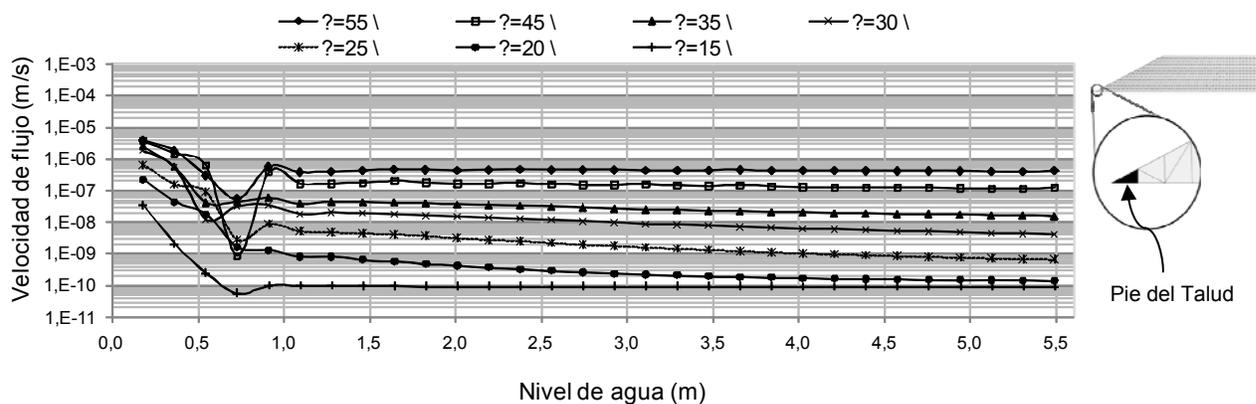


Figura 5.48 Variación de la velocidad de flujo al pie del talud para distintas velocidades de llenado.

5.1.2.4 Colocación de drenes

Para modelar el uso de drenes para el llenado rápido, se utilizaron las geometrías presentadas en la Figura 5.25. Los gradientes hidráulicos fueron medidos en la cara del talud al finalizar el llenado, cerca de la línea de nivel de agua, por debajo de la línea de saturación. De manera general todos los drenes presentaron una disminución en el gradiente hidráulico. El mejor resultado se obtiene al utilizar dos drenes horizontales debido a la cercanía de la zona donde se generan gradientes hidráulicos.

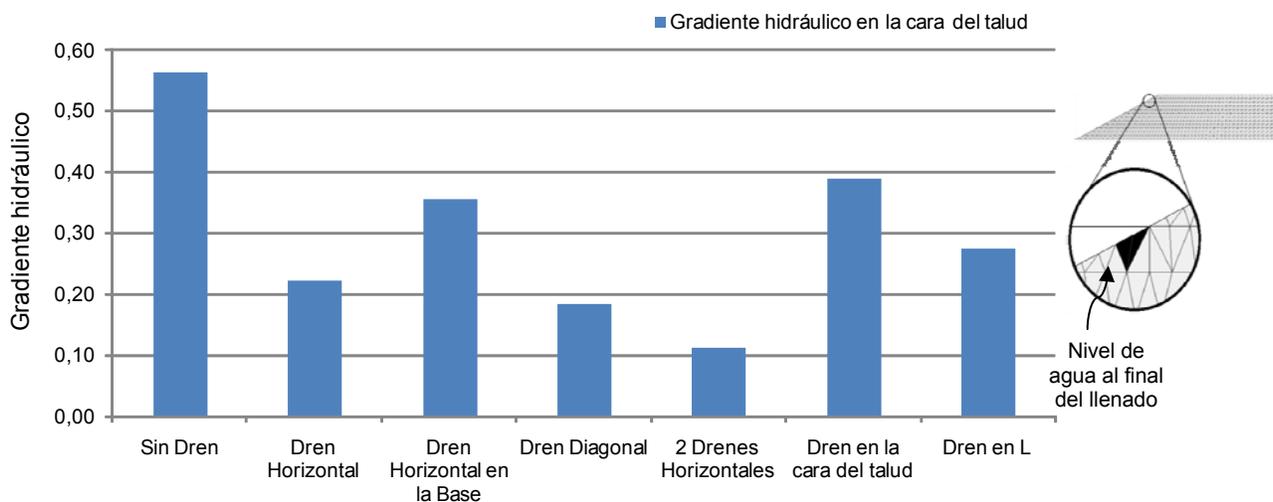


Figura.5.49 Gradientes hidráulicos en la cara del talud al final del llenado rápido.

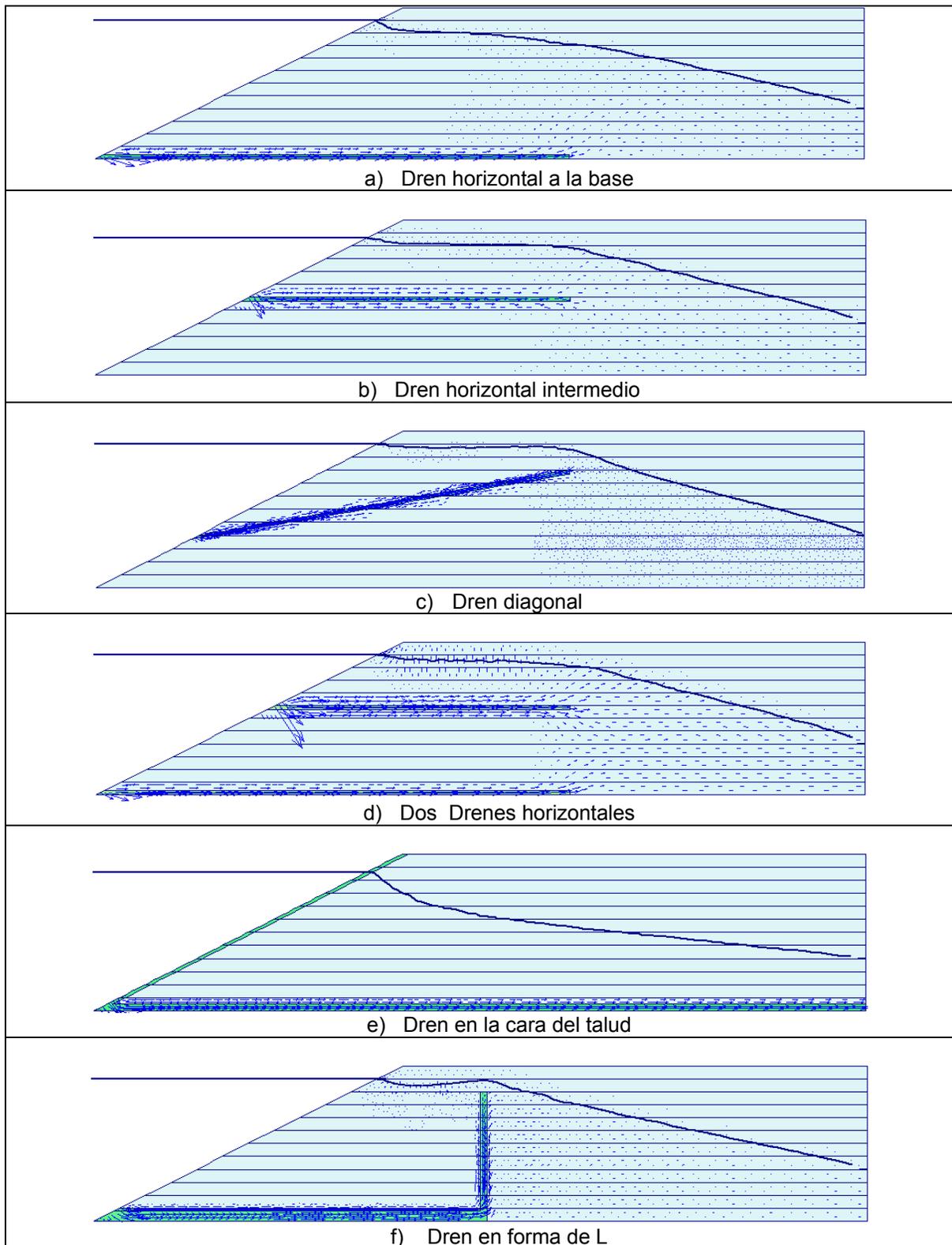


Figura 5.50 Comparativo de los vectores de velocidad para los distintos drenes al final del llenado rápido.

5.2 Análisis del flujo transitorio para un bordo de protección de áreas urbanas

A continuación se estudia el flujo transitorio ocasionado por el llenado y vaciado rápido en un bordo de protección *tipo* que se utiliza para la defensa de zonas urbanas en la ciudad de Villahermosa (Figura 4.7b). Para realizar el análisis se utilizó el método de elementos finitos con el programa *Plaxflow*. La geometría simplificada del dominio de estudio incluye una sección del suelo de cimentación del bordo. La geometría completa se muestra en la Figura 5.51.

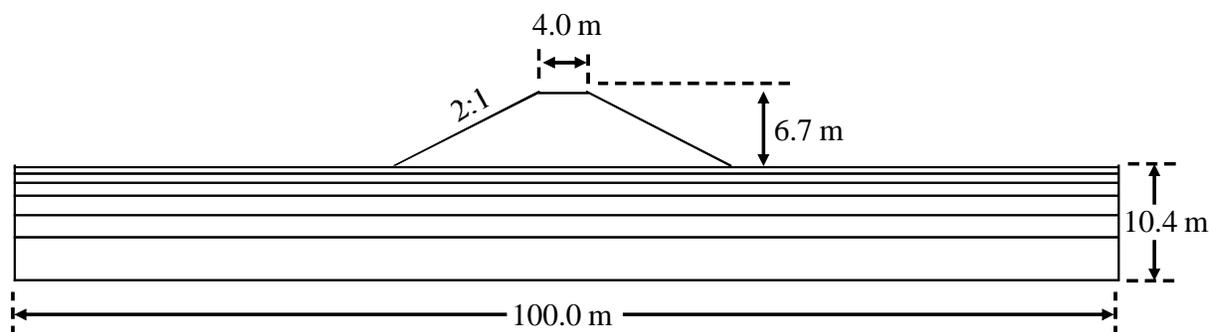


Figura 5.51 Geometría simplificada para los bordos de protección

Con base en la información revisada por Auvinet (et. al. 2008) acerca de la geología y las distintas campañas de exploración realizadas cerca de los bordos de protección (Anexo III), se determinó una secuencia de materiales finos, compuestos principalmente de arena fina, limo y arcillas con plasticidad variable (Figura 5.52) En la tabla 5.1 se presentan los detalles de las propiedades de cada uno de los materiales constitutivos de la sección inicial de suelo.

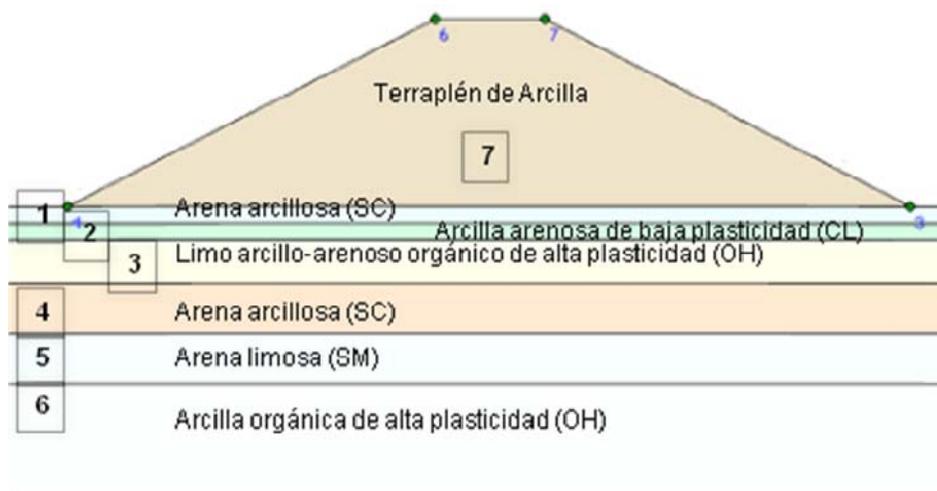


Figura 5.52 Sección de suelo considerada en el análisis.

Tabla 5.1 Propiedades de los materiales

N° de material	Espesor [m]	Material	Conductividad hidráulica "k" [m/s]	Relación de vacíos "e"
1	0.6	Arena arcillosa (SC)	1×10^{-6}	0.43
2	0.6	Arcilla arenosa de baja plasticidad (CL)	1×10^{-6}	0.50
3	1.6	Limo arcillo-arenoso orgánico de alta plasticidad (OH)	1×10^{-7}	0.90
4	1.8	Arena arcillosa (SC)	1×10^{-6}	0.43
5	1.8	Arena limosa (SM)	1×10^{-6}	0.43
6	4.0	Arcilla orgánica de alta plasticidad (OH)	1×10^{-7}	0.90
7	6.7	Terraplén de Arcilla	1×10^{-7}	0.70

Información del Sondeo SM-01 (KM 0+54, tramo I) Servicios Integrales de Ingeniería y Calidad S.A. de C.V. en septiembre de 2003

5.2.1 Flujo transitorio por llenado y vaciado rápido

Para definir las distintas velocidades de llenado y vaciado rápido, se consideró la información contenida en los boletines hidrométricos y de presas del Organismo de Cuenca Frontera Sur de la Comisión Nacional del Agua, acerca de los niveles de los ríos inmediatos a la ciudad de Villahermosa que presentaron condiciones extraordinarias durante los meses de octubre y noviembre de 2007 (Figura 5.53).

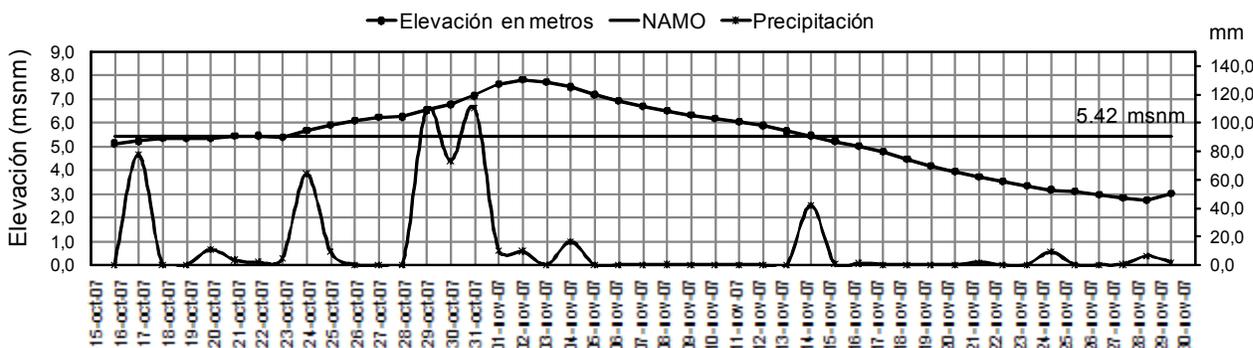


Figura 5.53 Información de la estación hidrométrica Gaviotas, correspondiente al periodo del 16 de octubre al 29 de noviembre de 2007 (CONAGUA, 2009).

Con base en los datos anteriores, las condiciones de frontera consideradas en el análisis son:

- Para el llenado: el agua sube de un nivel inicial de 13.7 metros hasta un nivel máximo de 16.4 metros, en un periodo de 17 días (con la variación que se señala en la figura 5.54a).
- Para el vaciado: el agua desciende del nivel máximo de 16.4 metros hasta un nivel final de 11.3 metros, en un periodo de 27 días (con la variación que se señala en la figura 5.54b).

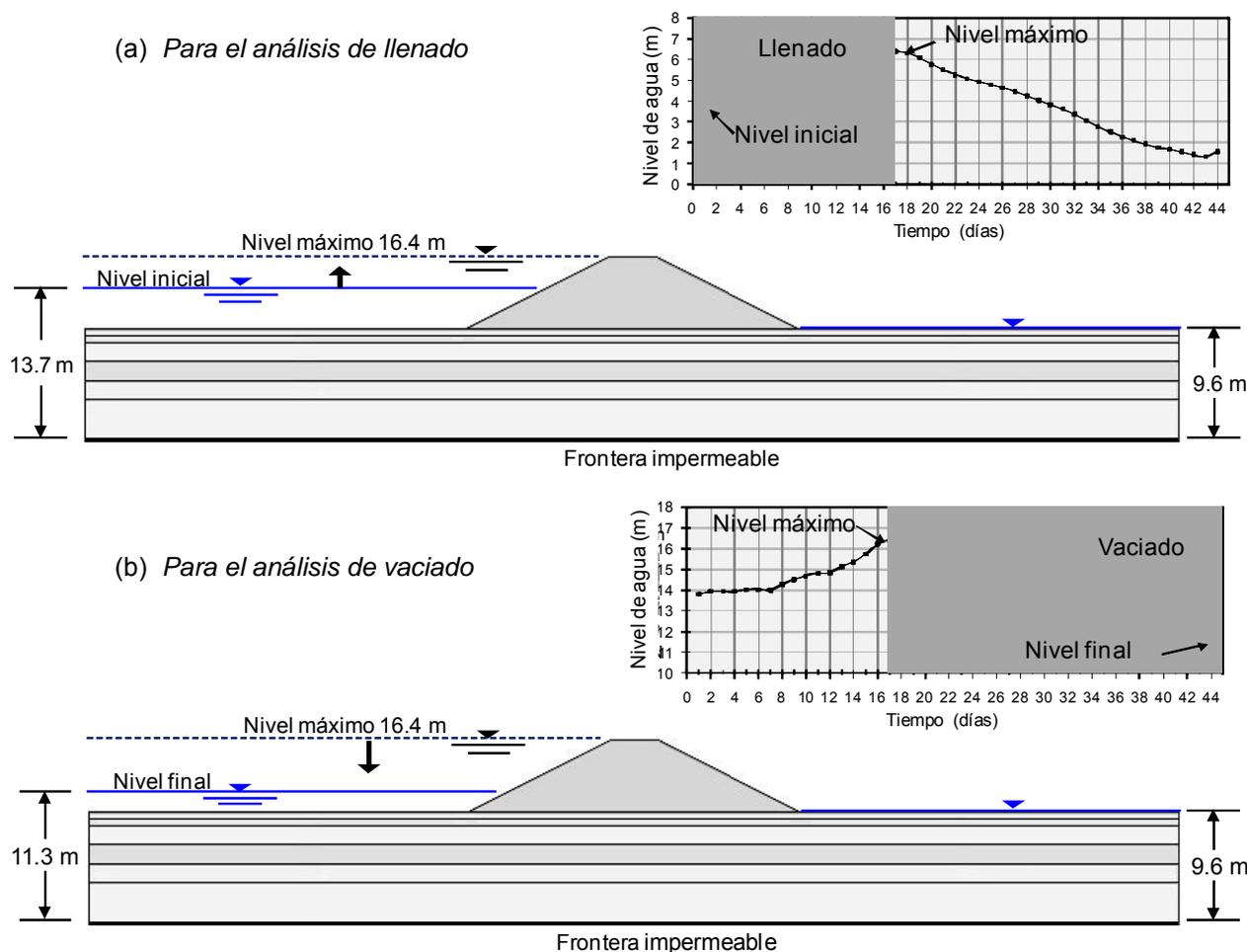


Figura 5.54 Condiciones de frontera consideradas para realizar el análisis.

Para dar inicio al análisis se considera que el nivel de agua que se indica en la Figura 5.54a corresponde a una condición de flujo establecida. En la figura 5.55 se muestran respectivamente la distribución de la presión de poro, las líneas de igual potencial hidráulico, el campo de velocidades de flujo y el campo de gradientes hidráulicos para dicha condición. En estas dos últimas figuras se observa que los valores máximos tanto del gradiente hidráulico ($i_{max} \approx 1$) como de la velocidad ($V_{max} = 1.2 \times 10^{-2}$ m/d) ocurren al pie del talud de aguas abajo del bordo. El gradiente hidráulico inclusive es prácticamente igual al valor del gradiente hidráulico crítico, i_{cr} , el cual se refiere a que los esfuerzos efectivos son nulos, es decir, no existe esfuerzo de contacto entre las partículas del suelo presentándose el fenómeno de tubificación. (Las capas observadas en las secciones corresponden a la estratigrafía mostrada en la Figura 5.52).

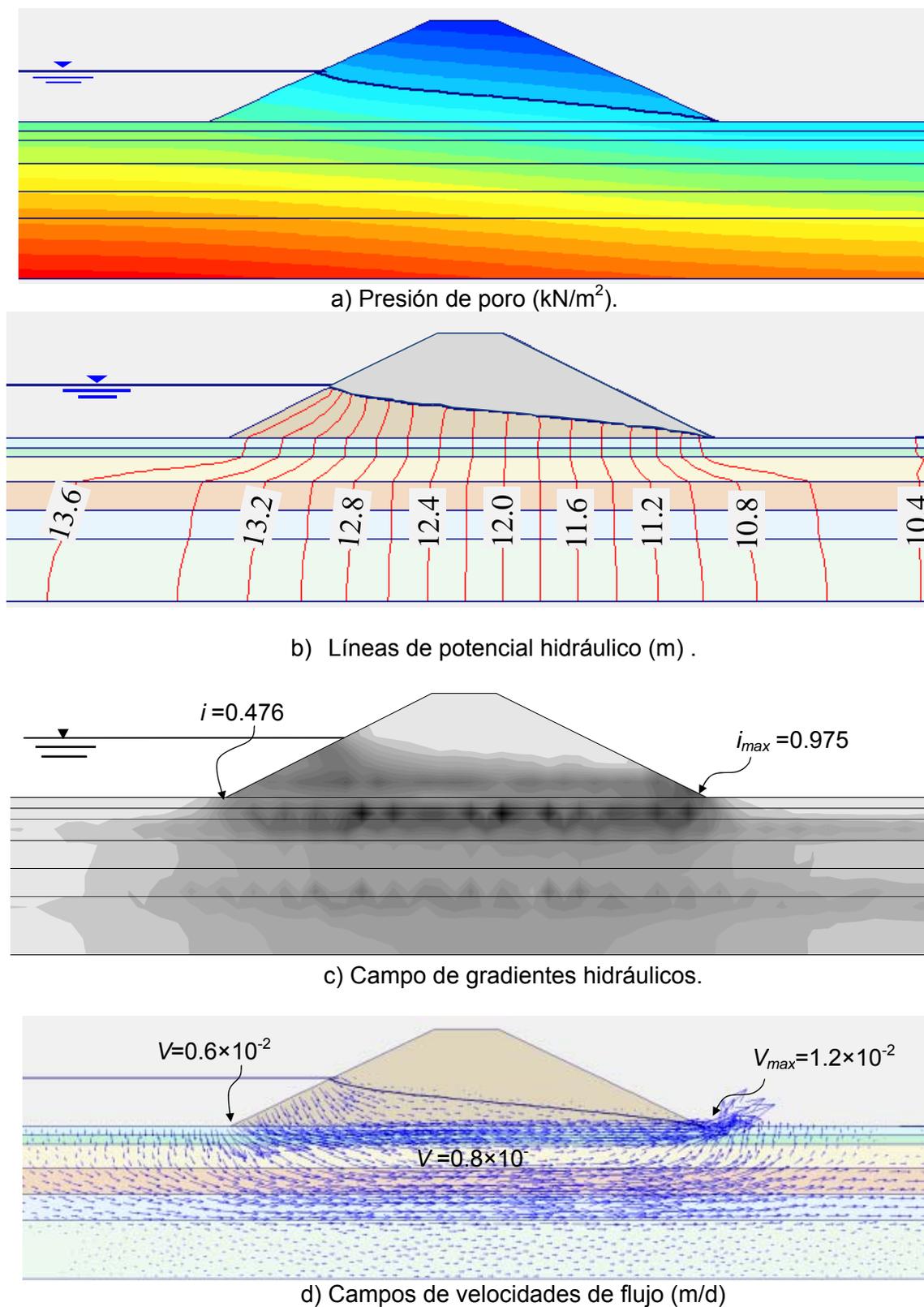


Figura 5.55 Resultados de la condición inicial de flujo establecido.

Para el caso del flujo transitorio, en la figura 5.56 se presenta la variación del grado de saturación para distintos tiempos durante el llenado y vaciado rápido. El grado de saturación permite conocer como se modifica la posición de las líneas de saturación y de desaturación dentro del cuerpo del bordo conforme ocurre el llenado y el vaciado.

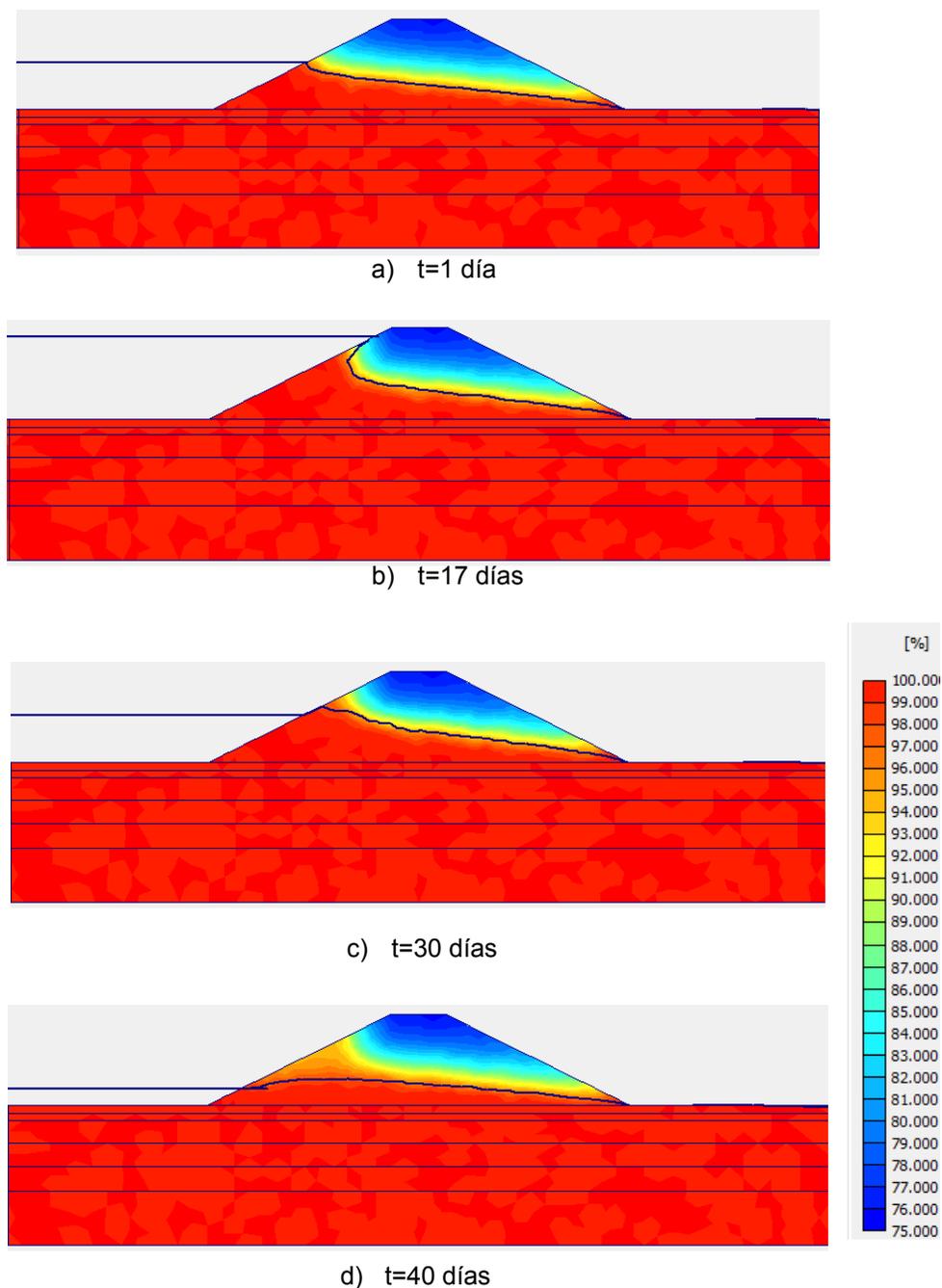


Figura 5.56 Grado de saturación (en %) para diferentes tiempos durante el llenado y vaciado rápido.

En la Figura 5.57 y 5.58 se muestran las curvas obtenidas para instantes representativos del llenado y vaciado rápido. Estas líneas presentan las características ya mencionadas para el caso de un bordo de protección homogéneo durante el llenado y el vaciado rápido.

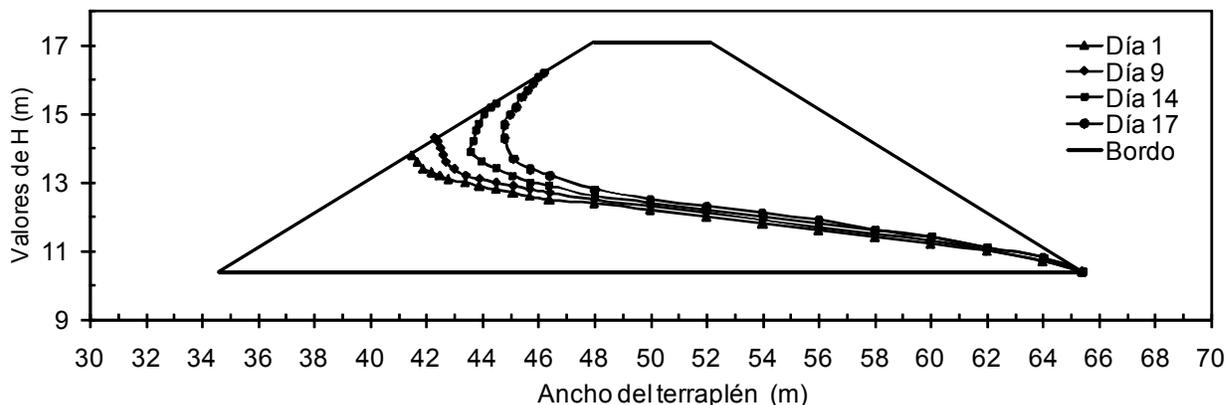


Figura 5.57 Líneas de saturación durante el llenado.

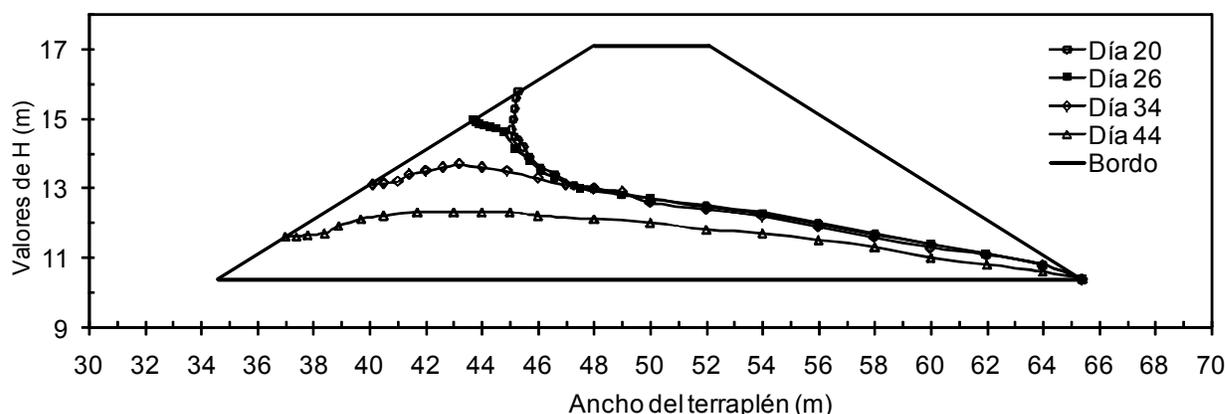


Figura 5.58 Líneas de saturación durante el vaciado.

Por su parte, las Figuras 5.59 y 5.60 muestran correspondientemente los campos de gradientes hidráulicos y de vectores de velocidad para distintos tiempos del llenado y vaciado rápido. En las mismas se puede apreciar que los máximos valores de estas propiedades ocurren cuando la superficie del agua alcanza su nivel más alto (día 17, elevación 16.4 m de la Fig. 5.59b); además, estos valores máximos se presentan al pie talud de aguas abajo del bordo. También se observa que en general, para la mayoría de los días en los que ocurre el llenado y vaciado rápido, los gradientes hidráulicos son mayores que el valor crítico ($i_{cr} \approx 1$); y aun cuando los valores más altos se manifiestan al pie del talud de aguas abajo del terraplén, los gradientes que se generan en el talud de aguas arriba (en su punta inferior y conforme se va incrementando el nivel del agua) no son despreciables (también rebasan el valor crítico). De las figuras anteriores también se puede concluir que, en general, los valores más altos de la velocidad de flujo se manifiestan en los materiales más permeables del dominio de estudio; en contraste, los valores más altos del gradiente hidráulico se presentan en los materiales más impermeables del dominio. Esto es un indicio de que los problemas de inestabilidad de los bordos no se solucionarían haciéndolos más impermeables, sino más bien colocando drenes en zonas estratégicas del cuerpo de los mismos como se mostró en el caso de estudio paramétrico durante el llenado rápido. (Las capas observadas en las secciones corresponden a la estratigrafía mostrada en la Figura 5.52).

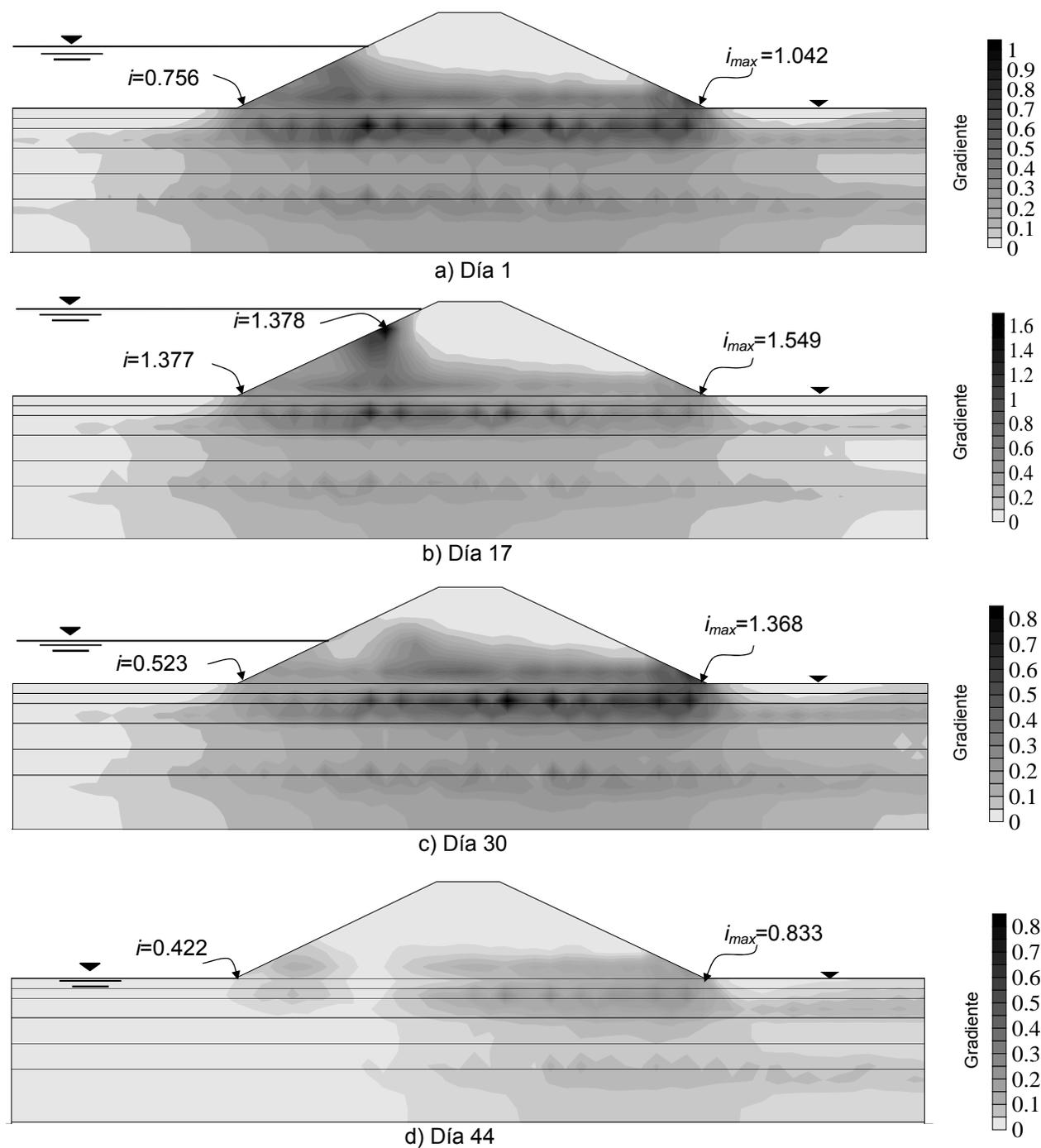


Figura 5.59 Gradientes hidráulicos (magnitud resultante) para diferentes tiempos durante el llenado y vaciado rápido.

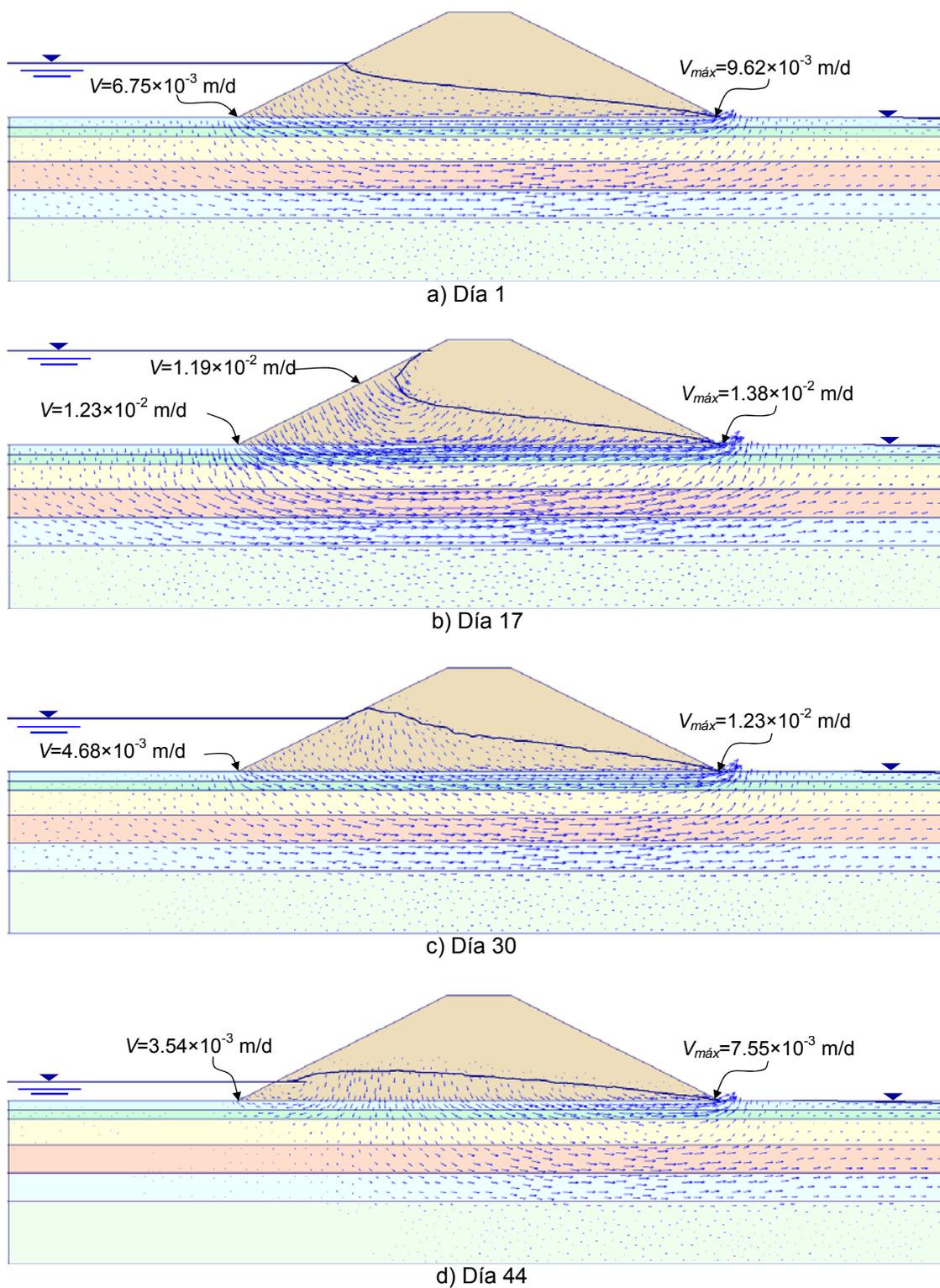


Figura 60. Vectores de velocidad (magnitud resultante) para diferentes tiempos durante el llenado y vaciado rápido.

5.2.2 Estudio paramétrico variando las velocidades de llenado y vaciado

Para completar el estudio en este tipo de bordos de protección, se realizó un estudio paramétrico en los que se hicieron variar las velocidades de llenado y vaciado tomando como datos iniciales la información obtenida de la estación hidrométrica Gaviotas. El objetivo es conocer como se modifican los gradientes y las velocidades de flujo en puntos de interés de los taludes de aguas arriba y aguas abajo del bordo.

Las curvas de las Figuras 5.61 - 5.64 muestran lo siguiente:

- Mientras más rápido es el llenado (corto tiempo), los valores máximos de los gradientes hidráulicos y las velocidades de flujo ocurren al pie del talud de aguas arriba del bordo (Figura 5.61 y 5.63).
- Por el contrario, mientras más lento es el llenado (largo tiempo), los valores máximos de los gradientes y las velocidades se presentan al pie del talud de aguas abajo del bordo (Figuras 5.62 y 5.64).
- Las magnitudes máximas de los gradientes y velocidades que se alcanzan al pie del talud aguas arriba y aguas abajo, tanto para el tiempo más corto y más largo del llenado, son prácticamente iguales (Figuras 5.61-5.64).
- Al inicio del llenado (día 1 en la Figura 5.62) el gradiente hidráulico al pie del talud de aguas abajo no presenta variaciones importantes al modificar la velocidad de llenado; es decir su magnitud permanece prácticamente constante y es aproximadamente igual al gradiente crítico ($i_{cr} \approx 1$) (Figura 5.62).
- En cambio, para esta misma condición (inicio del llenado) pero en el talud de aguas arriba, el gradiente hidráulico presenta variaciones importantes cuando se modifica la velocidad de llenado. En general la magnitud del gradiente se incrementa de manera significativa (rebase el gradiente crítico $i_{cr} > 1$) para velocidades de llenado muy pequeñas (Figura 5.61).

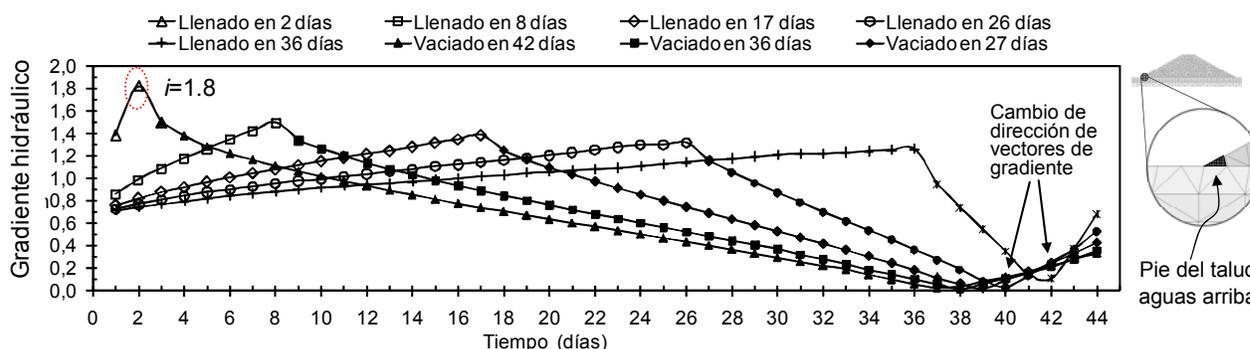


Figura 5.61. Variación del gradiente hidráulico respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

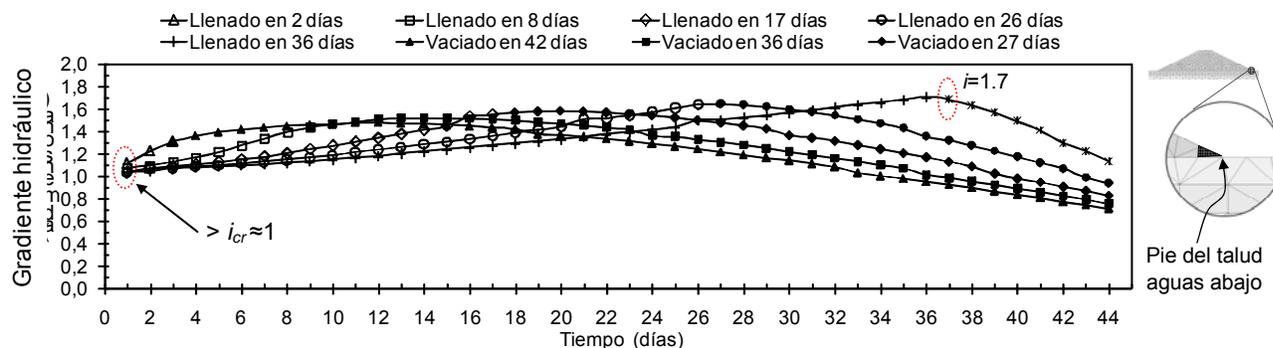


Figura 5.62 Variación del gradiente hidráulico respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

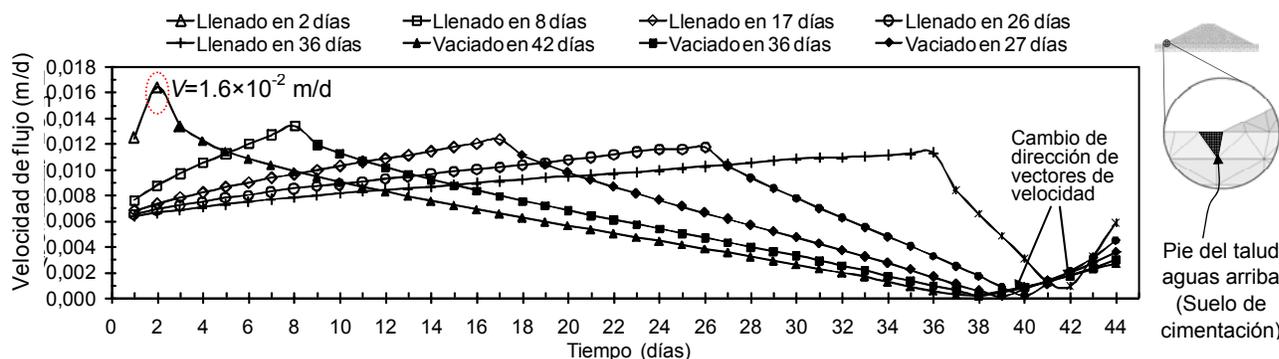


Figura 5.63 Variación de la velocidad de flujo respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

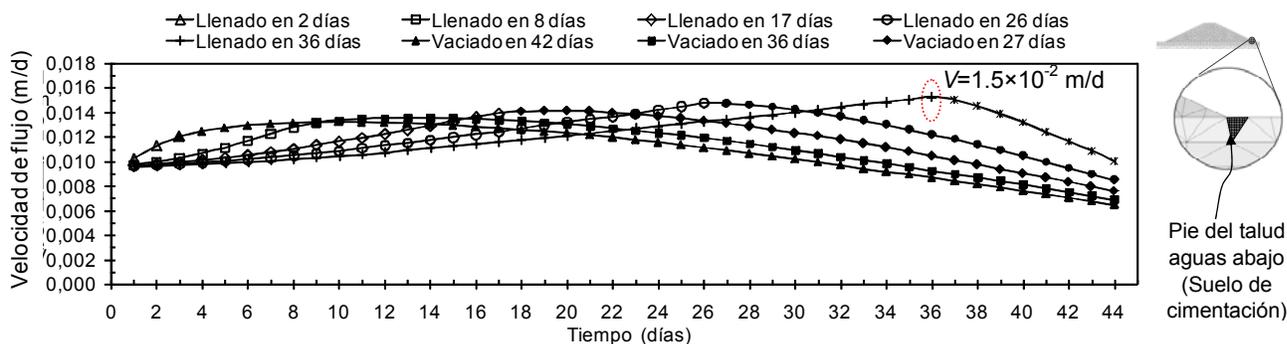


Figura 5.64 Variación de la velocidad de flujo respecto al tiempo para velocidades de llenado y vaciado variables.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se estudió el flujo transitorio ocasionado por el fenómeno de llenado y vaciado rápido en bordos de protección típicos de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, tomando en cuenta la información acerca de las inundaciones que ocurrieron durante 2007. Los análisis se realizaron utilizando el método analítico de J. Alberro y el método de elementos finitos. De los análisis efectuados se pudo determinar lo siguiente:

Para el estudio de flujo transitorio de un bordo de protección en la margen de los ríos.

Durante el vaciado rápido, la velocidad máxima de flujo (y por consecuencia el gradiente hidráulico y la fuerzas de filtración) se alcanza cerca del contacto entre el nivel de agua con el talud alcanzando su valor máximo al pie del talud cuando finaliza el vaciado. Cuando es considerado el aporte de agua de lluvia, la velocidad máxima de flujo se multiplica en la cara del talud, y las velocidades de flujo máximas se presentan en fases intermedias durante el vaciado, cerca de la línea del nivel de agua y la cara del talud.

Durante el llenado rápido la velocidad máxima de flujo se alcanza cerca del contacto entre el nivel de agua con el talud, alcanzando su valor máximo al final del llenado, cerca del contacto entre la línea de saturación y la cara del talud. Cuando es considerado el aporte de agua de lluvia, las condiciones de flujo se modifican y el agua fluye fuera del bordo, aunque el nivel de agua vaya en aumento. Las velocidades de flujo máximas varían durante el aumento del nivel de agua, alcanzando sus valores máximos en etapas intermedias durante el llenado.

Del análisis paramétrico durante el vaciado rápido se observa que independientemente de la conductividad hidráulica y la velocidad de abatimiento del nivel de agua, el valor final del gradiente hidráulico máximo (generado al pie del talud al final del vaciado) es el mismo, (aproximadamente $i = 0.5$), es decir, la velocidad de flujo máxima (al final del vaciado) es directamente proporcional a la conductividad hidráulica del bordo. Conjuntamente, el cambio en el ángulo de talud favorece la inestabilidad del bordo debido al aumento en el gradiente hidráulico que sobrepasa el valor del gradiente hidráulico crítico ($i_{cr} \approx 1$) en ángulos mayores a 35° .

Del análisis paramétrico durante el llenado rápido se obtiene que las líneas de saturación se ven fuertemente influenciadas por los cambios en la conductividad hidráulica y en la velocidad de llenado debido a que la tasa de crecimiento de la zona saturada es altamente dependiente de las propiedades del suelo en condiciones no saturadas (conductividad hidráulica, contenido de humedad etc.). Se muestra además, que el uso de materiales muy impermeables (conductividades hidráulicas menores a 1×10^{-5} m/s) para la construcción del cuerpo del bordo favorece la inestabilidad del mismo, debido a las altas velocidades de flujo (y en consecuencia los valores de los gradientes hidráulicos y fuerzas de filtración) que se generan dentro del cuerpo del bordo, anulan las fuerzas resistentes a la erosión interna. Las fuerzas de filtración producidas en esas zonas pueden facilitar la tubificación local del material y por tanto favorecer la inestabilidad de los bordos.

El método analítico de J. Alberro permite obtener una buena aproximación de las líneas de saturación y de desaturación, exceptuando los casos donde los valores de las propiedades son extremos (valores de conductividad hidráulica y velocidad de vaciado o llenado) principalmente durante el llenado rápido, ya que el método se ve restringido por las condiciones de frontera y las simplificaciones que se utilizan para la resolución de la ecuación diferencial del modelo inicial. Sin embargo, el método proporciona una rápida y eficaz solución para determinar la posición de las

líneas de desaturación y saturación, aunque el fenómeno no cumpla rigurosamente con la hipótesis de Polubarinova-Kochina acerca de la cuasiverticalidad de las líneas equipotenciales.

Para este tipo de bordos, se mostró que para ambos fenómenos (llenado y vaciado rápido) la colocación de dos drenes horizontales (uno en la base y uno a mitad del cuerpo del bordo) ofrece una mejor solución para disminuir los gradientes hidráulicos y las velocidades de flujo que se generan dentro del cuerpo del bordo y donde se generan las velocidades máximas para ambos caos.

Para el estudio de flujo transitorio en los bordos de protección de aéreas urbanas.

Los valores más altos de gradientes hidráulicos y velocidades de flujo se obtienen cuando se alcanza el nivel máximo de la superficie del agua. Dichos valores máximos ocurren al pie del talud de aguas abajo del bordo; sin embargo en el talud de aguas arriba (pie del talud y conforme se va incrementando el nivel de agua), la magnitud de gradientes y velocidades no es despreciable. En general, en el caso del gradiente hidráulico y para las condiciones geométricas, hidráulicas y de frontera consideradas en los análisis, estos altos valores rebasan el gradiente crítico ($i_{cr} \approx 1$); además, su ubicación sugiere la colocación de un dren dentro del bordo para disminuir la magnitud de los gradientes altos y ayudar con ello a mejorar su estabilidad.

Por otra parte, de los resultados de los análisis paramétricos se observa que para una mayor velocidad de llenado, los valores máximos de los gradientes hidráulicos y las velocidades de flujo ocurren en el talud aguas arriba del bordo (al pie del talud y conforme incrementa el nivel de agua). En contraste, a menor velocidad de llenado y mayor velocidad de vaciado, los valores máximos de los gradientes y velocidades se presentan al pie del talud aguas abajo del bordo.

En general, para este tipo de bordos son dos condiciones las que pueden afectar su inestabilidad.

1. Que se generen altos gradientes hidráulicos en ciertas zonas del cuerpo del bordo o estratos del suelo de cimentación, que ocasionen problemas de tubificación global a través del bordo o a través de la cimentación.
2. Que durante el vaciado se generan altos gradientes hidráulicos en el talud de aguas arriba del bordo conforme baja el nivel de agua, que faciliten la tubificación local del material en estas regiones.

Para contribuir a la estabilidad de los bordos que se ven afectados por el fenómeno de llenado y vaciado rápido se recomienda:

- No construir con materiales con coeficientes de conductividad hidráulica pequeños (conductividades hidráulicas menores a 1×10^{-5} m/s). También debe evitarse utilizar materiales muy permeables que provoquen velocidades de flujo altas que induzcan la remoción de las partículas del bordo.
- Dar poca pendiente a los taludes (ángulos menores a 30°) y evitar la erosión al pie y en la superficie del talud.
- Incorporar drenes en la sección transversal de los bordos, preferentemente horizontales, para evitar la generación de gradientes hidráulicos que rebasen el valor del gradiente crítico y evitar la tubificación.

Conjuntamente, es recomendable complementar el estudio paramétrico para bordos de protección de áreas urbanas variando las propiedades del suelo de cimentación (conductividad hidráulica, porosidad y geometría de los estratos) para conocer el comportamiento de la velocidad de flujo dentro del mismo y conocer bajo qué condiciones es posible que se presenten asentamientos provocados por la tubificación.

Extender el estudio del flujo transitorio al análisis de la estabilidad de los taludes de los bordos aquí presentado con métodos de resistencia al corte, debido a que los métodos tradicionales de equilibrio límite, como por ejemplo: el Método de dovelas (Fellenius 1936), Método de Bishop modificado (1955), Método de equilibrio de fuerzas (e.g. Lowe and Karafiath 1960), Método de Janbu (1968), Método de Morgenstern y Prince (1965), y el Método de Spencer (1967) requieren de el cálculo de una superficie de falla preferencial. Un método de resistencia al corte (por ejemplo el Método de Elemento Finito), representa una poderosa alternativa para el análisis de estabilidad de talud debido a que requiere menos hipótesis a priori, especialmente para el cálculo respecto al mecanismo de falla (Griffiths, 1999).

Referencias

Amos S., 1991, The Gulf of Mexico Basin: Geological Society of America, The Geology of North America.

Auvinet, G. y López-Acosta, N.P., 2009, Condición de vaciado rápido en taludes sumergidos, Memorias del homenaje al Ing. Jesús Alberro A., Edición de Instituto de Ingeniería UNAM y Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG), México.

Auvinet, G. y López-Acosta, N.P. y Pineda A. R., 2008, Informe final (Parte Geotecnia) del Plan Hídrico de Tabasco (PHIT), Instituto de Ingeniería, UNAM, México. pp 27-160.

Alberro, J., Hernández R. y Levtchouk. V., 2001, Estabilidad de un talud sometido a un flujo transitorio de agua por vaciado rápido, Series del Instituto de Ingeniería, N° 625, Agosto, México.

Alberro, J. y Hernández R., 2002, "Estabilidad del talud de un embalse sometido a un flujo transitorio de agua por llenado rápido", Series del Instituto de Ingeniería, N° 632, Octubre, México.

Braja, M. D., 2007, Fundamentos de ingeniería geotécnica. Cengage Learning Editores.

Braja, M. D., 2006, Principios de ingeniería de cimentaciones, Cengage Learning Editores.

Comisión Nacional del Agua, Compendio Básico del Agua en México 2002, México, 2001.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, determinación de agua en el acuífero samaria, estado de Tabasco, México, 2002.

Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, México, 2008.

Comisión Nacional del Agua, Nota informativa, Plan hídrico de tabasco, Villahermosa Tabasco, Septiembre 2009.

Christian, J. T., 1980, Flow nets from finite element data, International Journal for numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 4, pp. 191-196.

Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1967, Diseño de presas pequeñas: Una publicación técnica de recursos hidráulicos, Continental, México.

Flores, R., 1999, Flujo de agua a través de suelos. Avances en hidráulica 4, Asociación Mexicana de Hidráulica e Instituto Mexicano de Tecnología de Agua, México.

Flores R., Alva F., y Xiangyue Li Liu, 2003, Efecto del flujo de agua en la estabilidad de taludes, Ingeniería hidráulica en México, vol. XVIII, núm. 2 pp. 35 - 52.

Freeze, R. A. (1971). "Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dams." *Water Resour. Res.* 7(4): 929-941.

González de Vallejo L., 2002, *Ingeniería geológica*, Printice Hall, Madrid

Gracia J. y Fuentes-Mireles O. La problemática del agua en Tabasco, inundaciones y su control. *El Agua en México vista desde la academia*, Academia Mexicana de las Ciencias, Edición digital, 2005, México

Griffiths, D.V. and Lane, P.A. (1999). "Slope stability analysis by finite elements." *Géotechnique* 49(3): 387-403.

Han J. Chen J. y Hong Z., 2008 *Geosynthetic reinforcement for riverside slope stability of levees due to rapid drawdown*, Science Press Beijing and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Liu, Deng and Chu (eds)

Huang, M. and Jia C-Q. 2009. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage. *Computers and Geotechnics* 36: 93-101

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe de las inundaciones de 2007 en el estado de Tabasco, Diagnostico preliminar, 2008.

Instituto Nacional de Ecología, 1978. *Ecoplan* del estado de tabasco, Primera fase, Volumen I, México

Juárez, Badillo y Rico, R., 1972, *Mecánica de Suelos*, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de suelos, Edit. LIMUSA.

Juárez, Badillo y Rico, R., 1972, *Mecánica de Suelos*, Tomo III Flujo de agua en suelos, Edit. LIMUSA.

Kazda I., 1990 *Finite element techniques in groundwater flow studies with applications in hydraulic and geotechnical engineering*, ELSEVIER.

Marchand Patrick y Thomas Hollad, 2003, *Graphics and GUIs with Matlab*, 3° Edition.

Lam, L. and Fredlund, D.G. 1984, Saturated-unsaturated transient finite element seepage model for geotechnical engineering. *Adv Water Resources* 7: 132-136.

Lam, L., Fredlund, D.G. and Barbour, S. L. 1987. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach. *Canadian Geotech. J.* 24: 565-580.

López-Acosta, N. P. & Auvinet, G., 1998, Flujo de agua en suelos con permeabilidad aleatoria, Memoria, XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, SMMS, Sesión 7, pp. 404-411, Puebla, México.

López-Acosta, N. P. y Auvinet, G. (2010). Flujo establecido y transitorio en la excavación de un dique seco. Revista electrónica Ide@s CONCYTEG (Consejo de Ciencia y Tecnología de Guanajuato). (20 Ago 2010). ISSN 00000409 (aceptado para publicación).

López-Acosta, N. P., 2010, Incertidumbre en el análisis de flujo de agua en suelos, Tesis de Doctorado en Ingeniería (Mecánica de Suelos), División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

López-Acosta N. P., Auvinet G., y Lezama J. L. 2010, Estudio del flujo transitorio ocasionado por llenado y vaciado rápido en bordos de protección. Memorias del 1er Coloquio de Jóvenes Geotecnistas. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG), México, D.F.

López-Acosta, N. P., Auvinet, G. and Lezama, J. L. 2010. Study of transient flow caused by rapid filling and rapid drawdown in protection levees. Geo-Institute ASCE Geotechnical Special Publication (GSP). Proceedings of the 5th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5, November 7-10, 2010). San Francisco, CA, USA (accepted for publication/in press).

López-Ramos, E., 1981, Paleografía y tectónica del Mesozoico en México. UNAM, Instituto de Geología, Rev. Vol. 5 núm. 2, p 158-177.

Lugo-Hubp, J., 1990, El relieve de la República Mexicana, UNAM, Instituto de Geografía, Rev. Vol. 9 núm. 1, p 82-111 UNAM, México.

Ramírez, M., 2008, "Lineamientos para el diseño de alternativas de obras de protección marginal y de estabilización de márgenes de los ríos de la Sierra, Carrizal y Grijalva en la ciudad de Villahermosa, Tabasco", Subdirección General Técnica de la Gerencia del Consultivo Técnico de la CONAGUA.

Rodríguez -Rodríguez, E., 2002, Las lagunas continentales de Tabasco, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, México.

Rubio H. y Triana C, 2006, Gestión integrada de crecientes, caso de estudio, México: Río Grijalva, Organización Meteorológica Mundial. Unidad de apoyo técnico.

Servicio Geológico Mexicano, 2001, Compilación de la carta geológica-minera Frontera E15-5, escala 1:250,00, México.

Servicio Geológico Mexicano, 2001, Compilación de la carta geológica-minera Villahermosa E15-8, escala 1:250,00, México.

Smith I. M. y Griffiths, 2004 D. V. Programming the finite element method, 4th ed. Hoboken, NJ

Marsal R.J. y Reséndiz D., Presas de tierra y enrocamiento, Capitulo 5 Flujo de agua, Limusa, México.

Maza, J. A. y Franco, V., 1997, Obras de protección para control de inundaciones, Capítulo. 15 del Manual de Ingeniería de Ríos, Series Instituto de Ingeniería. UNAM

Mendoza, M., 1998, Geotecnia, Capítulo 23 del Manual de Ingeniería de Ríos, Series Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Muñoz Rafael y Rodríguez Axel, 2005, Hidrología Agroforestal. Canarias, Mundi-Prensa.

Ortega F., 1981, La evolución tectónica premisisipica del sur de México., UNAM, Instituto de Geología, Rev. Vol. 5, núm. 2, p 140-157.

Plaxis, *Plaxflow versión 1.4*, 2006, Scientific Manual, Edited by R.B.J. Brinkgreve, Delft University of Technology & Plaxis, The Netherlands.

Polubarinova-Kochina, P. Y., 1962, Theory of groundwater movement, Princeton Ed., Princeton, NJ.

Portillo Armando, 2003, Presas de tierra y bordos, Trabajo de Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Escuel Superior de Ingeniería y Arquitectura. México.

Rayano, Manuel, 2008, Fenómenos de tubificación en presas pequeñas de tierra. Dpto. de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNNE.

Rubio Horacio y Ramírez Triana 2006, Programa asociado de gestión de crecientes, Gestión integrada de recientes caso de estudio México: rio Grijalva. Organización Meteorológica Mundial

Sánchez Esteban, 2003, Estabilidad de Talud en presas de tierra y enrocamiento, Trabajo de Tesis, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. México.

Van Genuchten M. Th., 1980, A closed form equation for predicting the hydraulic function of unsaturated soils, Journal of Science Society of America, 44.

Referencias electrónicas

American society of civil Engineers (ASCE), 2009, So, you live behind a levee, <http://www.asce.org/files/pdf/SoYouLiveBehindLevee.pdf>, (consultado Julio, 2010)

Comisión Nacional del Agua. Dirección Local de tabasco. Plan hídrico de Tabasco. <http://www.conagua.gob.mx/dltab/Default.aspx> (consultado Junio 2009)

Comisión Nacional del Agua. Plan hídrico de Tabasco. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/PlanHidricoIntegralTabasco.pdf> (consultado Mayo 2009)

Comisión Nacional del Agua. Plan hídrico de Tabasco. <http://www.conagua.gob.mx/dltab07/notap/informacionphitparainternet9dejunio.pdf> (consultado Junio 2010)

Gobierno del estado de Tabasco. Hidrografía. <http://www.tabasco.gob.mx/estado/geo-hidrografia.php> (consultado Marzo, 2009)

Gobierno del estado de Tabasco. Orografía. <http://www.tabasco.gob.mx/estado/geo-orografia.php> (consultado Marzo, 2009)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Información geográfica. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/tab/geolo.cfm?c=444&e=02> (consultado Marzo, 2009)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Información geográfica. http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/tab/sombreado_ri.cfm?c=444&e=082 (consultado Abril, 2009)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Información geográfica. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/tab/rh.cfm?c=444&e=32> (consultado Abril, 2009)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Tabasco. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&e=27> (consultado Junio, 2010)

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (STC) <http://dgst.sct.gob.mx/fileadmin/Isoyetas/tabasco.pdf> (consultado Agosto, 2010)

Servicio Geológico Mexicano. Cartas digitales. <http://www.sgm.gob.mx/index.php> (consultado Julio, 2009)

Anexo I. Características del programa *Dflow* V1.2

Para realizar el cálculo de las líneas de superficie durante el llenado y vaciado rápido se utilizó el programa *Dflow* programado en *Matlab* en su versión 2009a con base al algoritmo publicado por J. Alberro (2001, 2002).

Datos de entrada

H₁ Nivel máximo de agua en el embalse en metros

H₂ Nivel mínimo de agua en el embalse en metros

H₃ Altura del nivel freático a una distancia horizontal **L** de la base del talud rocoso en metros (solo llenado rápido)

N Porosidad efectiva del material

K Permeabilidad del material en metros/día

A Velocidad de ascenso o descenso del agua en el embalse

γ Ángulo del talud rocoso con respecto a la horizontal en grados

TIEMPOS Número de tiempos elegidos para cubrir el tiempo de vaciado o llenado en el embalse (Tiene que ser menor a PUNTOS)

PUNTOS Número de puntos elegidos para el cálculo de las superficies libres (Inferior a 20)

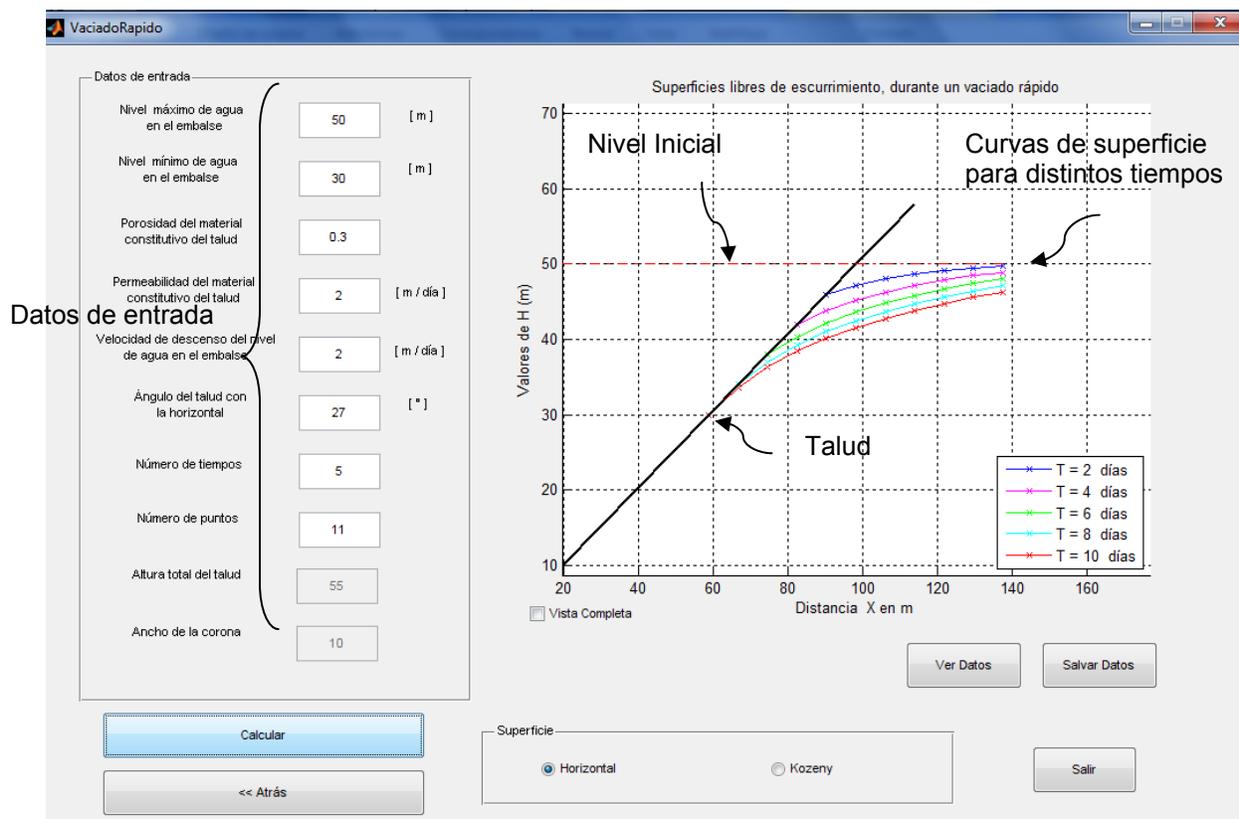
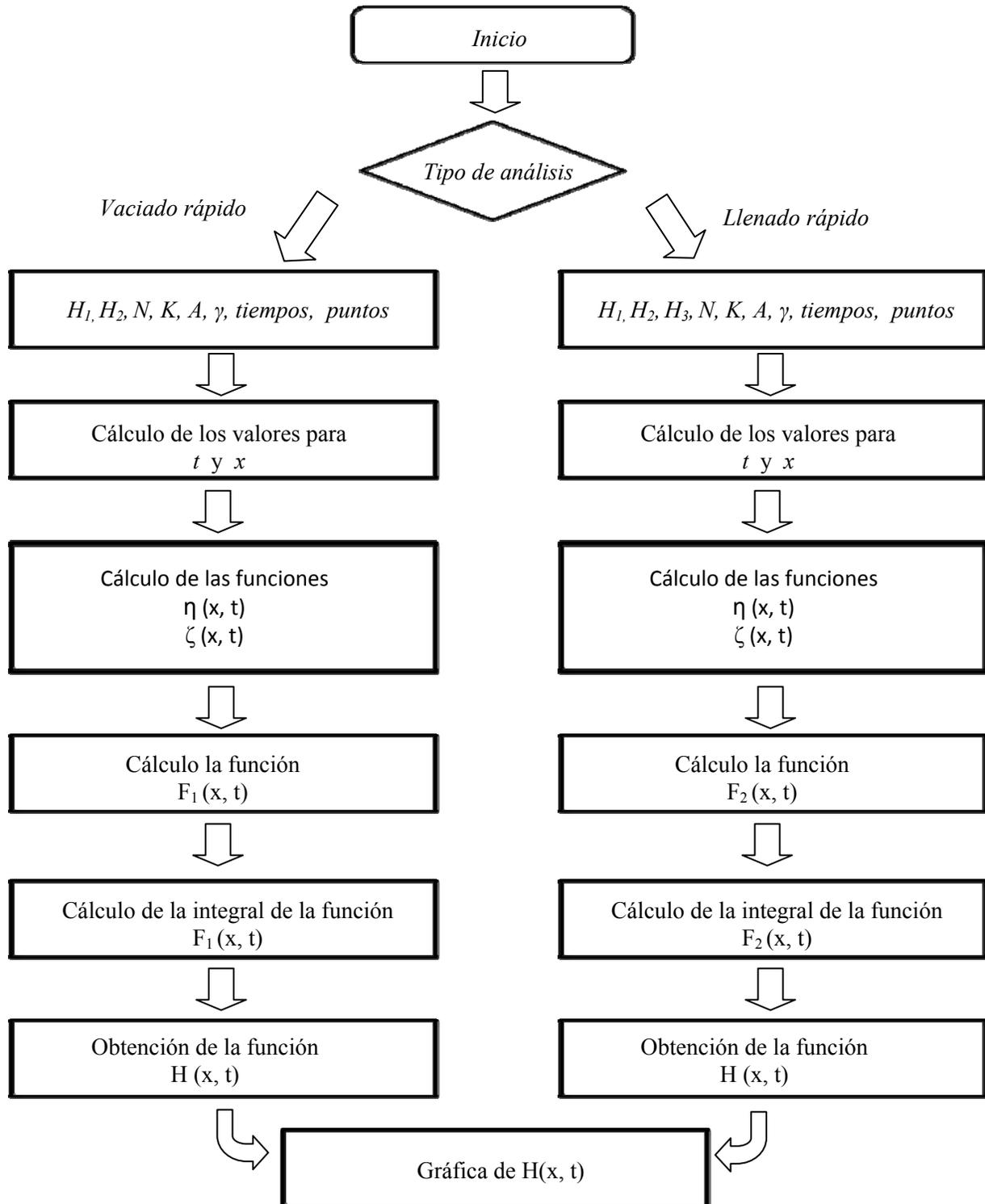


Figura A1. Ventana del programa *Dflow* para calcular las líneas de superficie libre durante el vaciado rápido

Diagrama de flujo



Anexo II. Tablas de datos de estaciones hidrométricas cercanas a la ciudad de Villahermosa durante el periodo Octubre-Noviembre de 2007 y 2008

Estación	NAMO [msnm]
Gaviotas	5,42

Tabla A1. Tabla de datos correspondientes a la estación hidrométrica Gaviotas.

Fecha	Nivel de agua [msnm]		Gasto		Precipitación [mm]	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
16-oct-07	5,14	6,12	826,00	813,00	-	0,10
17-oct-07	5,24	6,11	865,00	811,00	77,40	4,50
18-oct-07	5,36	6,05	912,00	806,00	0,10	15,80
19-oct-07	5,36	6,10	835,00	811,00	0,00	13,10
20-oct-07	5,34	6,09	833,00	808,00	10,70	31,20
21-oct-07	5,45	6,00	844,00	817,00	3,30	5,00
22-oct-07	5,46	5,99	847,00	794,00	1,70	1,10
23-oct-07	5,41	5,93	842,00	782,00	4,40	2,50
24-oct-07	5,69	5,85	915,00	744,00	64,00	6,00
25-oct-07	5,92	5,80	947,00	739,00	9,20	0,80
26-oct-07	6,10	5,67	993,00	724,00	0,00	0,00
27-oct-07	6,22	5,62	1006,00	734,00	0,00	1,30
28-oct-07	6,26	5,53	1008,00	705,00	-	0,60
29-oct-07	6,54	5,60	1400,00	720,00	108,80	11,80
30-oct-07	6,77	5,56	1585,00	705,00	73,00	0,20
31-oct-07	7,15	5,43	1618,00	683,00	110,10	0,10
01-nov-07	7,62	5,26	1750,00	666,00	10,20	-
02-nov-07	7,81	5,13	1772,00	660,00	9,50	0,00
03-nov-07	7,73	5,03	1486,00	645,00	0,00	0,00
04-nov-07	7,51	4,80	1406,00	620,00	16,20	0,00
05-nov-07	7,19	4,46	1340,00	612,00	0,00	0,00
06-nov-07	6,92	4,30	1243,00	600,00	0,00	0,00
07-nov-07	6,70	4,23	1016,00	592,00	-	0,00
08-nov-07	6,50	4,08	987,00	574,00	0,30	-
09-nov-07	6,34	4,01	950,00	567,00	0,00	0,00
10-nov-07	6,19	3,89	920,00	551,00	-	0,00
11-nov-07	6,04	3,78	890,00	476,00	-	0,00
12-nov-07	5,89	3,64	860,00	463,00	-	-
13-nov-07	5,66	3,50	811,00	449,00	0,00	-
14-nov-07	5,46	3,36	768,00	435,00	41,70	-
15-nov-07	5,23	3,22	726,00	421,00	0,40	-
16-nov-07	5,03	3,16	690,00	398,00	1,10	10,10
17-nov-07	4,78	3,42	665,00	460,00	0,00	6,00
18-nov-07	4,46	3,52	588,00	470,00	0,00	2,00
19-nov-07	4,18		503,00		0,00	
20-nov-07	3,94		438,00		-	
21-nov-07	3,71		378,00		1,60	
22-nov-07	3,52		329,00		0,00	
23-nov-07	3,34		309,00		0,00	
24-nov-07	3,18		290,00		9,10	
25-nov-07	3,11		283,00		0,00	
26-nov-07	2,98		257,00		-	
27-nov-07	2,84		159,00		0,30	
28-nov-07	2,75		150,00		6,10	

Estación	NAMO [msnm]
Pueblo Nuevo	7.49

Tabla A2. Tabla de datos correspondientes a la estación hidrométrica Pueblo Nuevo.

Fecha	Nivel de agua [msnm]		Gasto		Precipitación [mm]	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
16-oct-07	7,60	7,36	685,00	435,00	-	18,80
17-oct-07	7,62	7,36	666,00	436,00	76,20	18,00
18-oct-07	8,06	7,20	732,00	428,00	0,00	22,60
19-oct-07	7,70	7,70	662,00	498,00	0,00	19,70
20-oct-07	7,50	7,97	652,00	671,00	9,70	9,50
21-oct-07	7,82	7,77	684,00	576,00	2,00	5,50
22-oct-07	7,58	7,48	659,00	482,00	8,80	0,00
23-oct-07	7,60	7,25	660,00	431,00	0,10	0,70
24-oct-07	8,10	7,16	979,00	426,00	25,50	2,30
25-oct-07	8,18	7,16	993,00	424,00	11,80	0,10
26-oct-07	8,16	6,88	900,00	396,00	0,00	0,00
27-oct-07	8,08	6,68	892,00	336,00	0,00	1,50
28-oct-07	7,92	6,74	876,00	364,00	-	0,00
29-oct-07	8,18	7,22	1008,00	459,00	164,60	11,00
30-oct-07	8,31	6,97	1054,00	406,00	128,00	1,50
31-oct-07	8,34	6,58	1070,00	354,00	65,10	0,00
01-nov-07	8,36	6,30	1080,00	341,00	9,20	-
02-nov-07	8,40	6,12	1092,00	332,00	7,30	0,00
03-nov-07	8,33	6,01	1084,00	238,00	0,10	0,00
04-nov-07	8,22	5,84	1023,00	210,00	3,40	0,00
05-nov-07	8,14	5,72	994,00	191,00	0,00	0,00
06-nov-07	8,01	5,64	678,00	175,00	0,00	0,00
07-nov-07	7,88	5,55	590,00	166,00	-	0,00
08-nov-07	7,74	5,44	514,00	160,00	0,00	-
09-nov-07	7,57	5,35	427,00	155,00	0,00	0,00
10-nov-07	7,37	5,26	398,00	129,00	-	0,00
11-nov-07	7,17	5,16	370,00	120,00	-	0,00
12-nov-07	6,98	4,90	341,00	110,00	-	-
13-nov-07	6,74	4,64	320,00	100,00	0,00	-
14-nov-07	6,55	4,37	309,00	90,00	0,00	-
15-nov-07	6,38	4,10	309,00	80,00	0,00	-
16-nov-07	6,32	3,91	346,00	71,00	0,60	16,00
17-nov-07	6,04	5,98	315,00	442,00	0,00	8,00
18-nov-07	5,64	5,45	285,00	320,00	0,00	1,10
19-nov-07	5,30		233,00		0,00	
20-nov-07	5,01		210,00		4,10	
21-nov-07	4,80		189,00		0,00	
22-nov-07	4,65		177,00		0,00	
23-nov-07	4,50		169,00		1,00	
24-nov-07	4,43		160,00		0,20	
25-nov-07	4,43		160,00		0,00	
26-nov-07	4,43		160,00		-	
27-nov-07	4,04		135,00		0,00	
28-nov-07	4,02		135,00		1,90	
29-nov-07	3,88		128,00		3,40	

Estación	NAMO [msnm]
Porvenir	4.74

Tabla A3. Tabla de datos correspondientes a la estación hidrométrica Porvenir.

Fecha	Nivel de agua [msnm]		Gasto		Precipitación [mm]	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
16-oct-07	4,35	5,29	819,00	1273,00	-	26,50
17-oct-07	4,42	5,25	836,00	1261,00	85,00	7,90
18-oct-07	4,54	5,20	838,00	1257,00	0,00	10,50
19-oct-07	4,58	5,22	842,00	1260,00	0,00	6,10
20-oct-07	4,59	5,16	844,00	1236,00	27,50	34,50
21-oct-07	4,69	5,10	854,00	1206,00	31,10	0,00
22-oct-07	4,70	5,14	867,00	1226,00	2,00	0,00
23-oct-07	4,64	5,11	837,00	1215,00	1,40	0,00
24-oct-07	4,89	5,05	865,00	1203,00	67,00	7,30
25-oct-07	5,16	5,02	897,00	1196,00	5,50	5,70
26-oct-07	5,32	4,95	896,00	1188,00	0,00	2,00
27-oct-07	5,41	4,86	1416,00	1167,00	0,00	3,20
28-oct-07	5,47	4,77	1422,00	1158,00	-	0,00
29-oct-07	5,68	4,81	1522,00	1162,00	102,00	12,70
30-oct-07	6,03	4,76	1601,00	1142,00	93,00	0,20
31-oct-07	6,37	4,66	2720,00	1122,00	67,50	0,00
01-nov-07	6,55	4,55	2930,00	1111,00	13,20	-
02-nov-07	6,65	4,40	2950,00	1069,00	11,00	0,40
03-nov-07	6,65	4,26	2950,00	1000,00	7,40	0,00
04-nov-07	6,58	4,14	2923,00	970,00	10,60	0,00
05-nov-07	6,42	3,98	2032,00	917,00	0,40	0,00
06-nov-07	6,28	3,87	1039,00	823,00	0,00	0,00
07-nov-07	6,05	3,77	1128,00	753,00	-	0,00
08-nov-07	5,88	3,66	1075,00	742,00	1,60	-
09-nov-07	5,59	3,58	1062,00	734,00	0,00	0,00
10-nov-07	5,43	3,48	1020,00	717,00	-	0,00
11-nov-07	5,27	3,40	978,00	653,00	-	0,00
12-nov-07	5,10	3,28	935,00	653,00	-	-
13-nov-07	4,87	3,16	912,00	653,00	0,00	-
14-nov-07	4,72	3,04	897,00	652,00	44,00	-
15-nov-07	4,52	2,92	877,00	652,00	0,20	-
16-nov-07	4,26	2,84	831,00	616,00	-	24,00
17-nov-07	4,06	2,79	795,00	598,00	0,00	11,50
18-nov-07	3,78	2,99	752,00	571,00	0,00	2,50
19-nov-07	3,51		700,00		0,00	
20-nov-07	3,26		671,00		38,00	
21-nov-07	3,04		576,00		30,00	
22-nov-07	2,91		515,00		0,00	
23-nov-07	2,75		475,00		0,00	
24-nov-07	2,62		460,00		40,80	
25-nov-07	2,62		460,00		0,00	
26-nov-07	2,62		460,00		-	
27-nov-07	2,29		444,00		0,00	
28-nov-07	2,21		480,00		4,60	
29-nov-07	2,52		507,00		9,50	

Estación	NAMO [msnm]
Muelle	4.24

Tabla A4. Tabla de datos correspondientes a la estación hidrométrica Muelle*.

Fecha	Nivel de agua [msnm]		Gasto		Precipitación [mm]	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
16-oct-07	4,82	5,77			-	18,60
17-oct-07	4,89	5,76			89,30	13,10
18-oct-07	5,01	5,70			12,60	12,40
19-oct-07	5,01	5,74			0,00	11,70
20-oct-07	5,02	5,74			15,30	36,90
21-oct-07	5,12	5,65			11,90	33,40
22-oct-07	5,13	5,63			0,80	7,90
23-oct-07	5,08	5,57			0,00	6,60
24-oct-07	5,36	5,49			56,90	1,30
25-oct-07	5,60	5,44			4,80	0,00
26-oct-07	5,68	5,31			0,00	0,00
27-oct-07	5,77	5,27			0,00	1,80
28-oct-07	5,92	5,18			-	0,00
29-oct-07	6,12	5,26			123,10	13,00
30-oct-07	6,48	5,22			90,70	0,00
31-oct-07	6,84	5,09			132,30	0,00
01-nov-07	7,14	4,92			12,00	-
02-nov-07	7,23	4,75			-	-
03-nov-07	7,19	4,68			-	-
04-nov-07	7,04	4,41			-	0,00
05-nov-07	6,76	4,11			-	0,00
06-nov-07	6,58	3,94			-	0,00
07-nov-07	6,51	3,94			-	0,00
08-nov-07	6,28	3,85			-	-
09-nov-07	6,12	3,77			-	0,00
10-nov-07	5,94	3,65			-	0,00
11-nov-07	5,76	3,54			-	0,00
12-nov-07	5,58	3,40			-	-
13-nov-07	5,35	3,26			-	-
14-nov-07	5,18	2,12			-	-
15-nov-07	4,96	2,98			-	-
16-nov-07	4,72	2,92			-	4,40
17-nov-07	4,52	3,18			-	2,20
18-nov-07	4,27	3,28			0,00	0,00
19-nov-07	3,90				0,00	
20-nov-07	3,66				-	
21-nov-07	3,44				-	
22-nov-07	3,28				-	
23-nov-07	3,11				-	
24-nov-07	2,98				-	
25-nov-07	2,87				-	
26-nov-07	2,73				-	
27-nov-07	2,61				-	
28-nov-07	2,54				6,00	
29-nov-07	2,76				1,50	

*No contiene información acerca del gasto

Estación	NAMO [msnm]
González	8.77

Tabla A5. Tabla de datos correspondientes a la estación hidrométrica González.

Fecha	Nivel de agua [msnm]		Gasto		Precipitación [mm]	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
16-oct-07	6,89	7,22	439,00	443,00	-	15,50
17-oct-07	6,86	7,16	426,00	416,00	32,00	3,00
18-oct-07	6,67	7,11	406,00	432,00	0,00	0,00
19-oct-07	6,47	7,18	358,00	434,00	0,00	17,60
20-oct-07	6,40	6,41	351,00	307,00	35,00	38,00
21-oct-07	6,51	6,31	362,00	295,00	1,80	4,50
22-oct-07	6,30	7,02	330,00	423,00	5,90	0,00
23-oct-07	6,15	7,05	312,00	429,00	2,00	0,00
24-oct-07	6,62	6,98	411,00	425,00	43,60	3,00
25-oct-07	7,42	6,99	507,00	426,00	3,00	0,00
26-oct-07	7,46	6,96	476,00	435,00	0,00	0,00
27-oct-07	7,33	6,89	448,00	409,00	0,00	4,50
28-oct-07	7,01	6,82	415,00	406,00	-	0,00
29-oct-07	7,24	6,80	435,00	403,00	105,90	9,00
30-oct-07	9,14	6,75	861,00	400,00	197,40	1,00
31-oct-07	10,20	6,71	1466,00	400,00	57,60	0,00
01-nov-07	10,16	6,66	1380,00	395,00	53,50	-
02-nov-07	9,82	6,62	1018,00	387,00	27,10	0,00
03-nov-07	9,68	6,58	981,00	374,00	0,00	0,00
04-nov-07	9,30	6,53	848,00	370,00	2,00	0,00
05-nov-07	8,50	6,49	728,00	383,00	0,00	0,00
06-nov-07	7,60	6,49	396,00	389,00	0,00	0,00
07-nov-07	6,57	6,47	194,00	384,00	-	0,00
08-nov-07	5,88	6,46	159,00	383,00	0,00	-
09-nov-07	5,63	6,44	126,00	380,00	0,00	0,00
10-nov-07	5,41	6,43	108,00	381,00	-	0,00
11-nov-07	5,18	6,39	90,00	379,00	-	0,00
12-nov-07	4,96	6,26	71,00	360,00	-	-
13-nov-07	4,70	6,13	60,00	340,00	-	-
14-nov-07	4,52	5,00	50,00	321,00	23,50	-
15-nov-07	4,29	5,85	58,00	302,00	0,00	-
16-nov-07	4,11	5,31	94,00	236,00	1,50	7,00
17-nov-07	3,90	4,96	80,00	166,00	0,00	3,50
18-nov-07	3,31	5,16	50,00	199,00	0,00	0,00
19-nov-07	3,10		47,00		0,00	
20-nov-07	2,97		45,00		10,00	
21-nov-07	2,90		40,00		3,80	
22-nov-07	2,85		38,00		0,00	
23-nov-07	2,81		36,00		0,00	
24-nov-07	2,81		36,00		17,50	
25-nov-07	2,83		37,00		0,00	
26-nov-07	3,02		85,00		-	
27-nov-07	2,91		60,00		12,00	
28-nov-07	3,68		143,00		3,00	
29-nov-07	4,48		282,00		2,00	

Anexo III. Características estratigráficas de los sitios cercanos a los bordos (Auvinet et. al. 2008)

Sitio	Prof. (m)	Estrato	N° golpes en SPT	Porcentaje de finos (%)	Contenido de agua W (%)	Límite líquido LL (%)	Límite plástico LP (%)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (°)	γ_m (kN/m ³)
SM-1 (NAF=2.8 m)										
Indeco	De 0.0 a 1.2	Arcilla arenosa de baja plasticidad y consistencia dura, con grava (CL)	25	F=54 A=35 G=11	15.3	29	16	---	---	22.2
	De 1.2 a 3.4	Arcilla arenosa de baja plasticidad y consistencia media, con grava (CL)	8	F=78 A=20 G=2	39	24	15	8.0	11.9	18.73
	De 3.4 a 11.8	Arcilla orgánica de alta plasticidad y consistencia media (OH)	7	F=98 A=2	49.2 a 54.2	69	39 a 46	---	---	17.04
	De 11.8 a 17.6	Materia orgánica (Pt)	27	F=95 A=5	61	195	83	---	---	16.22
	De 17.6 a 21.8	Arcilla limo-arenosa de baja plasticidad y consistencia de dura (CL)	22	F=80 A=20	38.4	35	21	---	---	18.56
	De 21.8 a 25.4	Arcilla arenosa de baja plasticidad y consistencia dura (CL)	23	F=56 A=44	30.5	30	21	---	---	19.50

Prof. (m)	Estrato	N° golpes en SPT	Porcentaje de finos (%)	Contenido de agua W (%)	Límite líquido LL (%)	Límite plástico LP (%)	γ_m (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (°)
SM-1 (km 0+540, tramo I) NAF = 0.80m									
De 0.0 a 0.6	Arena arcillosa (SC)	1	22	23	28	19	19.8	---	---
De 0.6 a 1.2	Arcilla arenosa de baja plasticidad (CL)	12	59	29.1	47	26	19.6	---	---
De 1.2 a 2.8	Limo arcillo-arenoso orgánico de alta plasticidad (OH)	---	76	29.7	58	36	19.2	54.0	10
De 2.8 a 4.6	Arena arcillosa (SC)	3	43	34.8	35	21	18.0	---	---
De 4.6 a 6.4	Arena limosa (SM)	18	29	30.7	29	---	19.1	---	---
De 6.4 a 10.4	Arcilla orgánica de alta plasticidad (OH)	11	91	54.8	66	42	15.9	49.5	10
SM-2 (km 7+600, tramo XI) NAF = 1.00m									
De 0.0 a 1.8	Arcilla arenosa de baja plasticidad (CL)	6	53	26.6	47	27	19.8	---	---
De 1.8 a 3.4	Arcilla limo-arenosa de alta plasticidad con grumos cementados (CH)	---	72	---	65	28	17.9	20.5	12
De 3.4 a 5.2	Arcilla orgánica de alta plasticidad (OH)	5	98	45.7	68 a 100	38 a 59	17.8	---	---
De 5.2 a 7.4	Arcilla orgánica de alta plasticidad (OH)	---	98	44.9	100	59	17.7	---	---
De 7.4 a 10.4	Arcilla limosa de baja plasticidad (CL)	13	97	29.7	48	25	19.4	---	---

Prof. (m)	Estrato	N° golpes en SPT	Porcentaje de finos (%)	Contenido de agua W (%)	Límite líquido LL (%)	Límite plástico LP (%)	γ_m (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción interna (°)
SM-3 (km 4+640, tramo VIII) NAF = 1.50m									
De 0.0 a 1.2	Limo arcilloso orgánico de alta plasticidad (OH)	13	86	29.0	59	34	19.4	---	---
De 1.2 a 2.8	Limo arcilloso orgánico de alta plasticidad (OH)	---	95	23.9	89	47	20.7	3.85	6
De 2.8 a 4.0	Arcilla orgánica de alta plasticidad (OH)	18	99	42.3	97	54	18.1	---	---
De 4.0 a 5.2	Limo arcilloso orgánico de alta plasticidad (OH)	15	97	40.3	83	43	18.2	---	---
De 5.2 a 6.2	Limo arcilloso orgánico de alta plasticidad (OH)	---	98	38.9	78	47	18.3	---	---
De 6.2 a 7.4	Limo arcilloso orgánico de alta plasticidad (OH)	10	95	36.4	62	33	19.1	---	---
De 7.4 a 10.4	Arcilla limosa de baja plasticidad (CL)	6	95	38	46	20	18.5	---	---