



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ESTIMACIÓN  
DEL BORDO LIBRE EN PRESAS DE TIERRA CON APLICACIÓN AL  
PROYECTO PACALORI**

**Director:**  
Ing. Felipe Eduardo Cisneros Espinoza, PhD

Tesis previa a la obtención  
del Título de Ingeniero Civil

**Tutor:**  
Ing. Rolando Armas Novoa, MSc

**Autores:**  
Elmer Leandro Barzallo Sarmiento  
Carlos Rafael Guerrero Merchán

Cuenca – Ecuador  
Octubre, 2013



## Resumen

La presente investigación pretende proponer una metodología práctica para estimar el bordo libre (distancia vertical entre la cresta de la presa y el nivel de agua en el embalse cuando el vertedero de excesos trabaja a su capacidad de diseño) con aplicación a las presas de tierra del proyecto PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DE AGUA DE LA PROVINCIA DE LOS RÍOS (PACALORI). Para ello preliminarmente se investigó el vínculo que este estudio tendría con la seguridad geológica, hidrológica e hidráulica; luego se identificó las posibles causas generadoras de olas y sus respectivos parámetros influyentes, considerando que su aplicabilidad es dependiente de la existencia de la información, para luego poder entender y describir c/u de los criterios obtenidos en la investigación. Adicionalmente se hará un análisis del fenómeno de las olas generadas por deslizamientos de ladera que caen en el embalse, aunque tienen una probabilidad muy baja de ocurrencia; en caso de producirse, pueden ocasionar graves daños sobre el talud de la presa. Finalmente se analizaron, mediante comparaciones entre criterios, parámetros influyentes, logrando afianzar la elección del criterio de mejor argumentos dispuso, siendo este el criterio: "Experiencia Cubana".

**Palabras clave:** Bordo Libre Normal, Bordo Libre Mínimo, Presas de Tierra, Desbordamiento, Velocidad de Viento, Deslizamientos, Trepada de la ola, Remanso, Asentamiento, Fetch.



## Abstract

This research aims to propose a practical methodology for estimating freeboard (vertical distance between the crest of the dam and the water level in the reservoir when the spillway works to the design capacity) with application to earth dams of the PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DE AGUA DE LA PROVINCIA DE LOS RÍOS (PACALORI) project. To accomplish this, we investigated the relationship that this study would have with geological, hydrological and hydraulic safety, and then we have been identified the possible causes of generating waves and their respective influencing parameters, considering that its applicability is dependent on the existence of the information. For then, we could understand and describe each of the criteria considered in the investigation. Additionally, an analysis of waves generated by landslides falling into the reservoir has been made, and although they have a very low probability of occurrence, if it occurs, can cause serious damage to the dam. Finally analyzed through comparisons between criteria influencing parameters, achieving secure the choice of the criteria with better arguments, which is the Experiencia Cubana criteria.

**Keywords:** Normal Freeboard, Minimum Freeboard, Earth Dams, Overtopping, Wind Velocity, Landslides, Wave Run-Up, Wind Set-Up, Settlement, Fetch.



## CONTENIDO

<b>Resumen .....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>3</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de Tablas .....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>8</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>14</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 1: Introducción General.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.    Introducción.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.    Objetivo general.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.    Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4.    Justificación.....</b>	<b>16</b>
<b>Capítulo 2: Marco Teórico .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.    Nociones generales.....</b>	<b>17</b>
2.1.1.    Fallos de presas de tierra por desbordamiento.....	17
2.1.2.    Categoría de las presas .....	17
<b>2.2.    Evaluación de la seguridad Geológica – Hidrológica – Hidráulica .....</b>	<b>18</b>
2.2.1.    Seguridad Geológica .....	18
2.2.2.    Seguridad Hidrológica.....	18
2.2.2.1.    Definición de niveles .....	19
2.2.3.    Seguridad hidráulica .....	19
2.2.3.1.    Definición de Bordo libre .....	19
<b>2.3.    Causas generadoras de olas en los embalses .....</b>	<b>20</b>
2.3.1.    Viento .....	20
2.3.2.    Deslizamiento .....	21
2.3.2.1.    Generación de la ola .....	22
2.3.2.2.    Propagación de la ola.....	27
2.3.2.3.    Altura de trepada de la ola .....	27
2.3.3.    Sismo .....	29
<b>2.4.    Parámetros considerados en la determinación del bordo libre .....</b>	<b>29</b>
2.4.1.    Laminación de diseño para el aliviadero .....	29
2.4.2.    Altura de la ola.....	29
2.4.3.    Altura de trepada de la ola .....	30
2.4.4.    Remanso .....	30
2.4.5.    Marea .....	31
2.4.6.    Seiches.....	31
2.4.7.    Asentamientos de la presa .....	31
2.4.8.    Altura de seguridad .....	32
<b>2.5.    Criterios para estimar el bordo libre.....</b>	<b>32</b>
2.5.1.    Según Experiencia Cubana.....	32
2.5.2.    Según USBR (United States Bureau of Reclamation) .....	36
2.5.2.1.    Estudios de alcance limitado.....	37
2.5.2.2.    Estudios a detalle .....	37
2.5.3.    Según Creager y Justin .....	42
2.5.4.    Según Linsley y Franzini .....	43



2.5.5.	Según Gómez y Arancil .....	45
2.5.6.	Según Marsal y Reséndiz .....	46
2.5.7.	Según Novak, Moffat, Nalluri y Narayanan .....	48
2.5.8.	Según Knappen .....	51
<b>Capítulo 3: Desarrollo .....</b>		<b>52</b>
3.1.	<b>Descripción y ubicación del proyecto.....</b>	<b>52</b>
3.2.	<b>Condiciones Generales del sitio.....</b>	<b>54</b>
3.2.1.	Topografía.....	54
3.2.2.	Geología.....	55
3.2.3.	Climatología.....	56
3.2.3.1.	Viento.....	56
3.2.4.	Hidrología .....	58
3.2.5.	Sismicidad .....	58
3.3.	<b>Cálculo de olas generadas por deslizamientos .....</b>	<b>59</b>
3.4.	<b>Desarrollo de los diferentes criterios.....</b>	<b>63</b>
<b>Capítulo 4: Análisis de Resultados.....</b>		<b>77</b>
4.1.	<b>Comparación entre los distintos criterios de estimación de bordo libre .....</b>	<b>77</b>
4.2.	<b>Validación del criterio de estimación de Bordo Libre a presas de características similares construidas en Ecuador .....</b>	<b>80</b>
<b>Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>		<b>82</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>		<b>84</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.3.1:</b> Fases de una ola generada por deslizamiento: (1) Generación de la ola, (2) Propagación de la ola, (3) Trepada de la ola sobre el talud [3].....	22
<b>Figura 2.3.2:</b> Parámetros que rigen la generación de olas de impulso. [3].....	22
<b>Figura 2.3.3:</b> Parámetros para la determinación de la velocidad de impacto de la masa deslizante [3]..	23
<b>Figura 2.3.4:</b> Parámetros que rigen la determinación de la altura de trepada de la ola. [3].....	27
<b>Figura 2.5.1:</b> Curvas de relación profundidad media del embalse ( $D$ ) y longitud de la ola ( $\lambda$ ) vs parámetros $\alpha$ y $\beta$ [6].....	34
<b>Figura 2.5.2:</b> Relación entre la velocidad y duración del viento sobre la superficie de agua, y la altura significativa de la ola [7] .....	39
<b>Figura 2.5.3:</b> La relación entre la velocidad de viento sobre la superficie de agua, Fetch efectivo y el periodo de la ola. [7].....	40
<b>Figura 2.5.4:</b> Relaciones de la ola de escurrimiento hacia arriba (trepada de la ola) vs pendiente del Dique [19]. .....	44
<b>Figura 2.5.5:</b> Características del oleaje .....	46
<b>Figura 2.5.6:</b> Características del oleaje [10]. .....	47
<b>Figura 2.5.7:</b> Relación entre el Fetch efectivo, la Velocidad del viento y la altura significativa de la ola [18] .....	50
<b>Figura 3.3.1:</b> Mapa de alturas en el sitio de la presa Macul 1 .....	59
<b>Figura 3.3.2:</b> Perfil estratigráfico en el sitio de la presa Macul 1 .....	60
<b>Figura 3.3.3:</b> Perfil estratigráfico en el vertedero de la presa Macul 1 .....	61

## Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1.1:</b> Resumen de las causas más importantes de fallas [1] .....	17
<b>Tabla 2.1.2:</b> Categorización según el riesgo potencial de una presa [25]. .....	18
<b>Tabla 2.3.1:</b> Relación de la velocidad de viento. [7] .....	20
<b>Tabla 2.3.2:</b> Limitaciones para el cálculo de olas generadas por deslizamientos [3]. .....	26
<b>Tabla 2.3.3:</b> Limitaciones para el cálculo de la altura de trepada de la ola. [3].....	29
<b>Tabla 2.4.1:</b> Altura de olas [13].....	30
<b>Tabla 2.4.2:</b> Altura adicional según la categoría. [6] .....	32
<b>Tabla 2.5.1:</b> Categoría de Presa [18]. .....	33
<b>Tabla 2.5.2:</b> Categoría de la obra vs Probabilidad de ocurrencia de viento máximo. [6].....	33
<b>Tabla 2.5.3:</b> Probabilidad de ocurrencia de la altura de la ola de acuerdo a la categoría de la obra. [6] .	34
<b>Tabla 2.5.4:</b> Factores de altura y longitud de ola. [6] .....	35
<b>Tabla 2.5.5:</b> Factor de parapeto. [6] .....	35
<b>Tabla 2.5.6:</b> Factores de revestimiento del talud aguas arriba. [6] .....	36
<b>Tabla 2.5.7:</b> Bordo Libre normal y mínimo recomendados en función del Fetch [7] .....	37
<b>Tabla 3.2.1:</b> Velocidades máximas del viento sugeridas para periodos de retorno ( $T_r$ ) entre 2 y 1000 años. [17].....	57
<b>Tabla 3.2.2:</b> Niveles en el Embalse Macul 1 .....	58
<b>Tabla 3.2.3:</b> Datos de sismo en un radio de 200km al rededor del Proyecto. ....	59
<b>Tabla 3.4.1:</b> Resultados de los ejemplos de cada criterio.....	76
<b>Tabla 4.1.1:</b> Resultados de Bordo libre Normal y Mínimo.....	77
<b>Tabla 4.2.1:</b> Valores de Bordo Libre: Presa Poza Honda .....	80
<b>Tabla 4.2.2:</b> Valores de Bordo Libre: Presa La Esperanza.....	81

## Lista de Símbolos

$a$	Altura de seguridad
$A$	Amplitud de la ola
$A_f$	Aceleración de fluencia del talud
$A_M$	Amplitud de la ola de altura máxima
$b$	Ancho de la masa deslizante
$BLM$	Bordo libre mínimo
$BLN$	Bordo libre normal
$c$	Velocidad de avance de la ola
$c_M$	Velocidad de avance de la ola de máxima altura
$C$	Cohesión
$D$	Profundidad de agua en el embalse
$F$	Fetch
$F_s$	Numero de Froude de la masa deslizante
$g$	Aceleración de la gravedad; $g = 9.81m/s^2$
$h_i$	Altura por incertidumbre hidrológica
$h_M$	Altura máxima de la ola
$h_s$	Altura significativa de la ola
$h_t$	Altura de trepada de la ola
$h_v$	Altura por mal funcionamiento del vertedero
$h_w$	Altura de la ola
$h_d$	Nivel máximo de descarga por el vertedero de excesos
$K_E$	Aceleración sísmica horizontal máxima
$l_s$	Longitud de la masa deslizante
$m$	Cotangente del talud aguas arriba de la presa
$m_s$	Masa del deslizamiento
$M$	Marea
$M_s$	Masa relativa
$M_t$	Magnitud de temblor
$n$	Porosidad de la masa deslizante
$NAM$	Nivel de agua máxima en el embalse



---

$NAN$	Nivel de agua normal en el embalse
$P$	Producto de impulso
$r$	Distancia radial desde la zona de impacto
$R$	Remanso
$R_t$	Distancia focal a la estación donde interesa
$s$	Espesor de la masa deslizante
$S$	Seiches
$S_s$	Espesor relativo
$t$	Duración del viento
$t_M$	Periodo de la ola de máxima altura
$t_w$	Periodo de la ola
$T$	Periodo natural del terreno
$T_r$	Periodo de retorno
$V_s$	Volumen de la masa deslizante
$V_S$	Velocidad de impacto de la masa deslizante
$V_t$	Velocidad del viento en tierra
$V_v$	Velocidad del viento sobre el agua
$x_M$	Distancia desde la zona de impacto hasta donde se produce la altura máxima de la ola
$\beta$	Angulo del talud aguas arriba de la presa
$\delta$	Ángulo de reposo de la masa deslizante
$\gamma$	Ángulo de propagación de la ola
$\Delta H$	Asentamiento
$\Delta H_E$	Asentamiento debido a acción sísmica
$\Delta Z$	Altura de la masa deslizante
$\theta$	Ángulo que forma la dirección del viento con la dirección del Fetch
$\lambda$	Longitud de la ola
$\lambda_M$	Longitud de la ola de máxima altura
$\rho_s$	Densidad de la masa deslizante
$\phi$	Angulo de fricción interna del suelo
$\omega$	Ángulo promedio de la ladera respecto a la horizontal



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Elmer Leandro Barzallo Sarmiento, autor de la tesis "Estudio y caracterización de criterios para la estimación del bordo libre en presas de tierra con aplicación al proyecto PACALORI", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 28 de Octubre de 2013

Elmer Barzallo Sarmiento  
CI: 1400630073

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Fundada en 1867

Yo, **Carlos Rafael Guerrero Merchán**, autor de la tesis “**Estudio y caracterización de criterios para la estimación del bordo libre en presas de tierra con aplicación al proyecto PACLORI**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 28 de Octubre del 2013

Carlos Rafael Guerrero Merchán  
CI: 0104139191

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Elmer Leandro Barzallo Sarmiento, autor de la tesis "Estudio y caracterización de criterios para la estimación del bordo libre en presas de tierra con aplicación al proyecto PACALORI", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de Octubre de 2013

Elmer Barzallo Sarmiento  
CI: 1400630073

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Carlos Rafael Guerrero Merchán, autor de la tesis “Estudio y caracterización de criterios para la estimación del bordo libre en presas de tierra con aplicación al proyecto PACALORI”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 28 de Octubre de 2013

Carlos Rafael Guerrero Merchán  
CI: 0104139191

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



## Dedicatoria

A mis padres, Luis y María, ejemplos de esfuerzo del diario vivir.

Mis hermanos considerados como ejemplos de, perseverancia, sacrificio y constancia cuyo fin, alcanzar las anheladas metas planteadas que a veces parecen imposibles, y que en realidad no lo son, simplemente se ven opacadas por la angustia y desesperación que a veces nos domina.

Agradezco a Dios, mi familia y amigos, por darme la fuerza necesaria de seguir adelante, consejos y apoyo incondicional respectivamente. Siendo los pilares de esta meta cumplida.

Carlos Guerrero  
Cuenca, Octubre del 2013



## **Agradecimiento**

Al Ing. Felipe Cisneros PhD., Director del Programa para el Manejo de Agua y Suelo (PROMAS), por su apoyo y confianza al permitirnos desarrollar una investigación aplicable al proyecto PACALORI. Además por el asesoramiento y tiempo dedicado al desarrollo de esta tesis.

Al Ing. Rolando Armas MSc., por su constante colaboración en el avance, desarrollo y finalización tan ansiada, mediante consejos, sugerencias y conocimientos transmitidos a través de su vasta experiencia en el diseño y construcción de presas de tierra.

Al Ing. Juanito Barbecho, por su aporte de ideas y sugerencias, que nos guiaron en el avance de esta investigación.

## Capítulo 1: Introducción General

### 1.1. Introducción

Actualmente, como en el pasado, las presas de tierra continúan siendo el tipo más común de estructuras contenedoras de agua, principalmente por su alta relación beneficio – costo. A pesar de la conveniencia de este tipo de presas, como toda estructura, corren el riesgo de colapsar por diversas causas, provocando importantes daños económicos directos e indirectos, sin tomar en cuenta la potencial pérdida de vidas humanas.

Según Middlebrooks [1], quien ha hecho una extensa recopilación de la experiencia de más de un siglo en la construcción de presas de tierra y enrocamiento, el evento que ha causado el mayor número de fallas es el desbordamiento de agua sobre la corona de la presa debido a que este tipo de presa es esencialmente incapaz de trabajar como estructura vertedora, por la naturaleza erosionable de los materiales utilizados en su construcción. Es por esta razón que se debe garantizar un bordo libre suficiente para que este tipo de falla no llegue a ocurrir.

### 1.2. Objetivo general

Estudio y Caracterización de criterios para la estimación del bordo libre en presas de tierra con aplicación al proyecto PACALORI.

### 1.3. Objetivos específicos

- ❖ Identificar los factores de mayor influencia presentes en la zona del proyecto para la determinación del bordo libre.
- ❖ Elaborar un cuadro comparativo de resultados obtenidos con los diferentes criterios.
- ❖ Recomendar un criterio de bordo libre idóneo para la zona del proyecto.
- ❖ Validar el criterio a presas de tierra construidas en el Ecuador

### 1.4. Justificación

El afinamiento en la estimación del bordo libre garantizará no solo un funcionamiento adecuado dentro del periodo de vida útil, sino también contribuirá a la disminución de la incertidumbre por el sobredimensionamiento de la altura de la presa, resultando beneficioso para el proyecto considerando el aspecto económico. Por otro lado, en la estimación del bordo libre en presas de tierra construidas en nuestro medio no siempre se consideran aspectos teóricos suficientes, lo que reduce la confiabilidad de las mismas y como consecuencia aumenta el nivel de riesgo a una eventual falla.



## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1. Nociones generales

#### 2.1.1. Fallos de presas de tierra por desbordamiento

Dado que el diseño y la construcción de presas de tierra están basados aun en gran medida en conocimientos empíricos, resulta útil revisar la experiencia acumulada en relación con los casos de comportamiento inadecuado [10]. En la tabla 2.1.1 se resume la experiencia de casi todo un siglo de mal comportamiento de presas de tierra, especialmente en los EEUU.

Causas de falla parcial o total	Porcentaje del total
Desbordamiento	30
Flujo de agua	25
Deslizamientos	15
Fugas en conductos enterrados	13
Erosión de taludes	5
Otras causas	7
Causas desconocidas	5

**Tabla 2.1.1:** Resumen de las causas más importantes de fallas [1]

Se consideran fallas catastróficas aquellas que técnica y económicamente resultarían irreparables, es decir un colapso total de la obra. La falla por desbordamiento de agua sobre la cortina en presas de tierra son de tipo catastróficas, ya que son incapaces de trabajar como estructura vertedora debido a que son muy susceptibles al contacto con el agua, por lo tanto la probabilidad de su ocurrencia debe mantenerse muy baja.

#### 2.1.2. Categoría de las presas

La categorización de obras de presas (Tabla 2.1.2) nos ayuda en la selección apropiada de criterios de diseño ya que deben ser más conservadores cuanto mayor es el riesgo potencial como pérdidas humanas o económicas aguas abajo ante la rotura o funcionamiento incorrecto de la estructura.

En el Ecuador las obras hidráulicas se categorizan de la siguiente manera:

CATEGORÍA	A	B	C
RIESGO	ALTO	SIGNIFICATIVO	BAJO
Pérdida directa de vidas	Seguro (en uno o más desarrollo residencial, comercial o industrial)	Incierto (localización rural con pocas residencias y solamente desarrollo transitorio o industrial)	No se esperan (debido a la localización rural sin viviendas)



Pérdidas de servicios esenciales	Interrupción de instalaciones esenciales y de vías de comunicación a niveles críticos	Interrupción de instalaciones esenciales y de vías de comunicación.	Ninguna interrupción de servicios, las reparaciones de los daños es simple o rápidamente reparable
Pérdidas en propiedades	Extensa sobre instalaciones públicas y privadas	Mayor afección pública y en instalaciones privadas	Tierras agrícolas privadas, equipos y edificios aislados
Pérdidas Ambientales	Alto costo de la mitigación o imposible de mitigar	Se requiere una mitigación importante	Daño incremental mínimo

**Tabla 2.1.2:** Categorización según el riesgo potencial de una presa [25].

- ✓ Presas de categoría A pueden afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, producir daños materiales o medioambientales muy significativos.
- ✓ Las presas de categoría B pueden estar localizadas en zonas rurales pero con poca población y correspondiente infraestructura.
- ✓ Las presas de categoría C ocasionarían baja probabilidad de pérdida de vidas humanas, económicas y ambientales. Las pérdidas económicas se limitan a las estructuras de cierre.

## 2.2. Evaluación de la seguridad Geológica – Hidrológica – Hidráulica

Siendo las presas estructuras complejas que comprenden un conjunto de subsistemas susceptibles a fallar de forma aislada o no, pretender que se pueda definir un único coeficiente de seguridad de manera global, es casi imposible. Es por este motivo que las metodologías de análisis de la seguridad normalmente subdividen el problema del análisis en diferentes áreas [12].

### 2.2.1. Seguridad Geológica

El estudio Geológico-Geotécnico debe permitir identificar las características que tengan las rocas y los suelos en la zona de implantación de las estructuras, a fin de detectar los problemas técnicos derivados de dicha implantación. En caso de que se determine o presuma técnicamente que van a existir altos grados de deformaciones o fallas en los suelos o rocas, se deben diseñar obras de mejoramiento de los suelos y rocas, para minimizar estos efectos [30].

### 2.2.2. Seguridad Hidrológica

El ciclo hidrológico impone en el sistema presa - embalse una dinámica de aparición de niveles de agua, subordinados principalmente a tres aspectos: el

hidrograma de entrada al embalse producto de la relación lluvia-escorrentía, la capacidad de las estructuras de desagüe, y la manera en que sean operados los sistemas [12].

La elevación de la lámina en el embalse es la variable fundamental en el análisis de la seguridad hidrológica, y resulta de la combinación del evento de creciente y la capacidad de desagüe conjunta de los aliviaderos y descargas [12].

### 2.2.2.1. Definición de niveles

Los niveles considerados en este estudio se describen a continuación:

- a) Nivel de Aguas Normales (NAN): Es el máximo nivel que puede alcanzar el agua del embalse en un régimen normal de explotación sin que se produzca el vertido en el aliviadero [12].
- b) Nivel de Aguas Máximas (NAM): Es el máximo nivel de diseño que se alcanza en el embalse si se produce la creciente extrema, es decir la acción laminadora, definida por los hidrólogos [12].

### 2.2.3. Seguridad hidráulica

Ante la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, sólo una buena ponderación de la fiabilidad en el funcionamiento de las estructuras hidráulicas, puede brindar un conocimiento amplio de las condiciones de seguridad hidráulica del embalse [12].

Las estructuras hidráulicas principales son los aliviaderos superficiales y los desagües de fondo que controlan el flujo de agua a través o aparte del cuerpo de presa. La seguridad de una presa dependerá por tanto, entre otros muchos factores, de la bondad del comportamiento de dichas estructuras para amplios rangos de caudales [12].

#### 2.2.3.1. Definición de Bordo libre

Se define como bordo libre o resguardo, altura vertical entre el nivel de agua del embalse en una situación concreta y la coronación de la presa, entendida ésta como la cota más elevada de la estructura resistente e impermeable del cuerpo de la presa. [12]

En relación a los niveles del embalse anteriormente definidos, se definen el bordo libre para las siguientes situaciones particulares del embalse:



- a) **Bordo Libre Normal**: Es la altura libre vertical necesaria para considera el efecto de la ola máxima que se desarrolla con el embalse en la cota de inicio de vertido [12].
- b) **Bordo Libre Mínimo**: Es la altura libre vertical necesaria para considerar el efecto de la ola máxima que se desarrolla en el embalse cuando se produce la lámina máxima de vertido, que es cuando vierte la avenida de diseño [12].

### 2.3. Causas generadoras de olas en los embalses

#### 2.3.1. Viento

Como una breve definición, el viento se genera debido a la variación de presión o de temperatura entre dos puntos. El mismo que se desplaza con movimiento horizontal de la masa de aire y en la meteorología se denominan los vientos según fuerza y dirección desde la que soplan [17].

Se considera al viento como una de las causas generadoras de olas de mayor o menor intensidad en los embalses, dependiendo de la ubicación geográfica del proyecto. La intensidad de la acción de las olas depende de los parámetros altura de la ola ( $h_w$ ) y longitud de la ola ( $\lambda$ ) los cuales son función del Fetch, y la profundidad del agua, la velocidad y duración del viento; cuando el viento empieza a soplar sobre una superficie de agua en reposo. La descripción de los parámetros mencionados se dará en el inciso 2.4 y serán evaluados de acuerdo al criterio (inciso 2.5)

Las pequeñas olas son causadas por las fuerzas tangenciales entre el viento y el agua, aumentando las olas en tamaño, a su vez su velocidad, hasta que se mueven a la misma velocidad del viento. La duración del viento puede ser un factor importante en la altura final de las olas, a no ser que la ola pase fuera de la región de los altos vientos o pegue en la línea de playa antes de que llegue a su crecimiento máximo.

Debe tenerse en cuenta que por lo general se tienen datos de velocidades de viento sobre el terreno y deben ser ajustados a la velocidad de viento sobre el embalse (8 a 10 m arriba de la superficie del agua) multiplicando por factores dados en la tabla 2.3.1

$F$ [millas]	0.5	1	2	3	4	5 (o más)
$F$ [km]	0.8	1.6	3.2	4.8	6.4	8 (o más)
$V_v/V_t$	1.08	1.13	1.21	1.26	1.28	1.30

**Tabla 2.3.1:** Relación de la velocidad de viento. [7]

La velocidad de viento en general, ni en los sitios más expuestos debe contarse con valores superior a los 110 km/hora [2].

*Fetch*.- se denomina a la distancia que recorre el viento en aguas abiertas sin obstáculo sobre el embalse y puede generar ondas hacia la presa. Generalmente se toma la mayor distancia directamente hacia la presa.

### 2.3.2. Deslizamiento

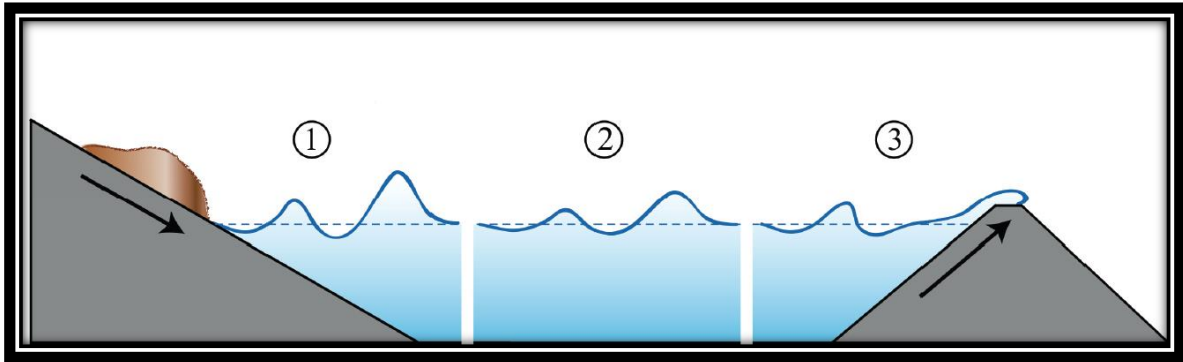
Los deslizamientos en laderas pueden ser provocados por causas naturales tales como:

- ❖ Condiciones de suelo y roca.- suelos saturados de agua, escombros poco consolidados y rocas fracturadas.
- ❖ Topografía.- la inclinación de las laderas es un factor determinante en la formación de deslizamientos. En general, mientras más grande es la pendiente, mayor es la amenaza por deslizamientos.
- ❖ Lluvia.- la cantidad y duración de la lluvia controlan la desestabilización de una ladera.
- ❖ Actividad Sísmica.- cuando se produce un temblor se generan vibraciones que pueden afectar el equilibrio de las laderas y originar deslizamientos. Cuanto mayor sea la intensidad, duración y frecuencia de la actividad sísmica, mayor es la amenaza por deslizamientos.
- ❖ Deforestación.- las áreas deforestadas favorecen la erosión y facilitan la ocurrencia de deslizamientos.

En caso de producirse un deslizamiento sobre un embalse, éste puede tener un efecto significativo como la generación de olas que pueden producir el rebose de agua sobre la presa, dependiendo de la velocidad con la que se mueven y el volumen de agua desplazado.

Para estimar tal efecto, en este trabajo se presenta un conjunto de ecuaciones que fueron el resultado de un estudio realizado en el Laboratorio de Hidráulica, Hidrología y Glaciología (VAW) de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich en Suiza [3].

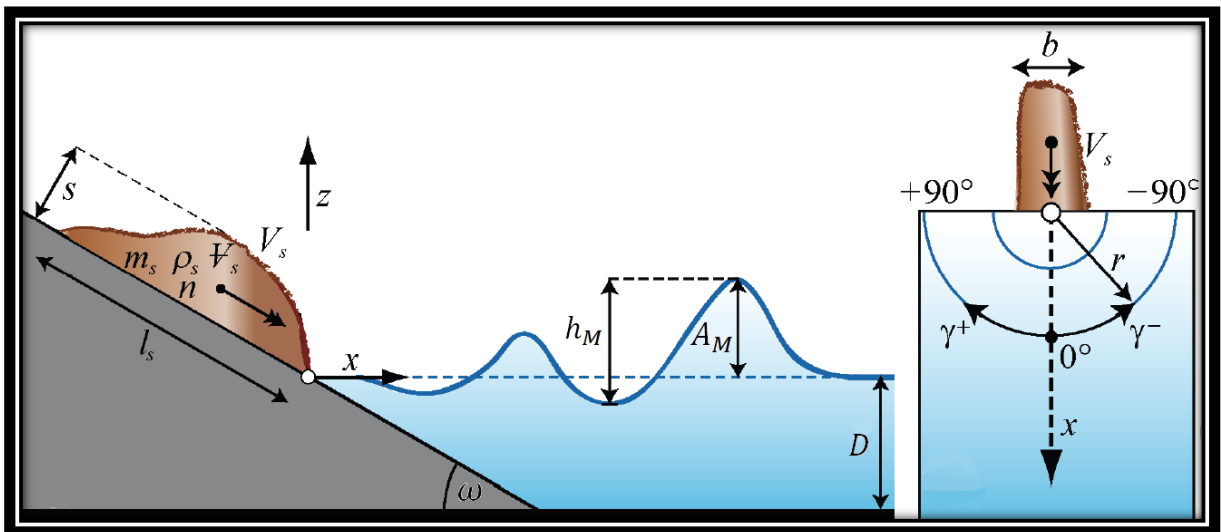
El estudio del deslizamiento de ladera sobre un embalse se puede dividir en tres fases (ver figura 2.3.1): En la primera se analiza el proceso de generación de la ola mediante el impacto del deslizamiento sobre el agua del embalse. En la segunda fase se analiza la propagación de la ola generada por el deslizamiento a lo largo del embalse. Finalmente, se estudia la interacción de la ola con la presa.



**Figura 2.3.1:** Fases de una ola generada por deslizamiento: (1) Generación de la ola, (2) Propagación de la ola, (3) Trepada de la ola sobre el talud [3].

### 2.3.2.1. Generación de la ola

La figura 2.3.2 muestra los parámetros más relevantes para la generación de olas debidas a deslizamientos:



**Figura 2.3.2:** Parámetros que rigen la generación de olas de impulso. [3]

Donde:

- $V_s$  Velocidad de impacto de la masa deslizante [m/s]
- $V_s$  Volumen de la masa deslizante [m<sup>3</sup>]
- $s$  Espesor de la masa deslizante [m]
- $b$  Ancho de la masa deslizante [m]
- $l_s$  Longitud de la masa deslizante [m]

$\rho_s$	Densidad de la masa deslizante [kg/m <sup>3</sup> ]
$m_s$	Masa del deslizamiento [kg]
$n$	Porosidad de la masa deslizante [%]
$\omega$	Ángulo promedio de la ladera respecto a la horizontal [°]
$\gamma$	Ángulo de propagación de la ola [°]
$r$	Distancia radial desde la zona de impacto [m]
$h_M$	Altura máxima de la ola [m]
$A_M$	Amplitud de la ola de altura máxima [m]
$D$	Profundidad de agua en el embalse [m]

### Procedimiento de cálculo

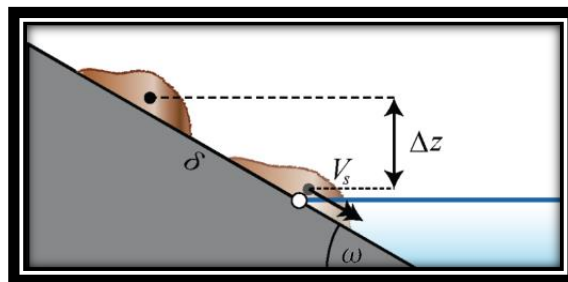
Según Körner [14] la velocidad de impacto de la masa deslizante ( $V_s$ ) puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$V_s = \sqrt{2g\Delta Z(1 - \tan \delta \cot \omega)} \quad (2.3.1)$$

Donde:

$V_s$	Velocidad de impacto de la masa deslizante [m/s]
$g$	Aceleración de la gravedad; $g = 9.81m/s^2$
$\omega$	Ángulo promedio de la ladera respecto a la horizontal [°]
$\delta$	Ángulo de reposo de la masa deslizante [°]
$\Delta Z$	Altura de caída de la masa deslizante [m]

En la figura 2.3.3 se muestra los parámetros involucrados en el cálculo de la velocidad de impacto de la masa deslizante:



**Figura 2.3.3:** Parámetros para la determinación de la velocidad de impacto de la masa deslizante [3].

El ángulo de reposo normalmente varía entre  $15^\circ \leq \delta \leq 35^\circ$ . Un valor de  $\delta \approx 20^\circ$  puede ser asumido independientemente del material que compone la masa deslizante [3].

El Producto de impulso ( $P$ ), el cual se refiere al momentum transmitido a la masa de agua en la dirección del deslizamiento, según Heller & Hager [15], tiene un rol importante en los cálculos y se define por las siguientes ecuaciones:

$$P = F_s S_s^{1/2} M_s^{1/4} \left[ \cos\left(\frac{6}{7}\omega\right) \right]^{1/2} \quad (2.3.2)$$

$$F_s = \frac{V_s}{\sqrt{gD}} \quad (2.3.3)$$

$$S_s = \frac{s}{D} \quad (2.3.4)$$

$$M_s = \frac{\rho_s \nabla_s}{\rho_w b D^2} \quad (2.3.5)$$

$$\nabla_s = s b l_s \quad (2.3.6)$$

Donde:

- $P$  Producto de impulso
- $F_s$  Numero de Froude de la masa deslizante
- $S_s$  Espesor relativo
- $M_s$  Masa relativa
- $\omega$  Angulo promedio de la ladera respecto a la horizontal [°]
- $V_s$  Velocidad de impacto de la masa deslizante [m/s]
- $g$  Aceleración de la gravedad;  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $D$  Profundidad de agua en el embalse (en la zona de impacto) [m]
- $s$  Espesor de la masa deslizante [m]
- $\rho_s$  Densidad de la masa deslizante [ $\text{kg/m}^3$ ]



- $V_s$  Volumen de la masa deslizante [ $m^3$ ]  
 $\rho_w$  Densidad del agua;  $\rho_w = 1000 \text{ kg}/m^3$   
 $b$  Ancho de la masa deslizante [m]

La altura máxima de la ola en la zona de impacto ( $h_M$ ) esta formada por una pared de agua más grande que una ola normal:

$$h_M = \frac{5}{9} P^{4/5} D \quad (2.3.7)$$

Donde:

- $h_M$  Altura máxima de la ola (en la zona de impacto) [m]  
 $P$  Producto de impulso  
 $D$  Profundidad de agua en el embalse (en la zona de impacto) [m]

La distancia desde la zona de impacto hasta donde se produce la altura máxima de la ola ( $x_M$ ) esta dada por:

$$x_M = \frac{11}{2} P^{1/2} D \quad (2.3.8)$$

Donde:

- $x_M$  Distancia desde la zona de impacto hasta donde se produce la altura máxima de la ola [m]  
 $P$  Producto de impulso  
 $D$  Profundidad de agua en el embalse (en la zona de impacto) [m]

La longitud de la ola de máxima altura ( $\lambda_M$ ) viene dada por la siguiente relación:

$$\lambda_M = t_M c_M \quad (2.3.9)$$

$$t_M = 9P^{1/2} \left(\frac{D}{g}\right)^{1/2} \quad (2.3.10)$$

$$c_M = \sqrt{g(D + A_M)} \quad (2.3.11)$$

$$A_M = \frac{4}{5} h_M \quad (2.3.12)$$

Donde:

- $\lambda_M$  Longitud de la ola de máxima altura [m]
- $t_M$  Periodo de la ola de máxima altura [s]
- $c_M$  Velocidad de avance de la ola de máxima altura [m/s]
- $P$  Producto de impulso
- $g$  Aceleración de la gravedad;  $g = 9.81m/s^2$
- $D$  Profundidad de agua en el embalse (en la zona de impacto) [m]
- $A_M$  Amplitud de la ola de máxima altura [m]
- $h_M$  Altura máxima de la ola (en la zona de impacto) [m]

En la tabla 2.3.2 se muestran las limitaciones para el cálculo de la altura máxima de la ola en la zona de impacto:

<b>Término</b>	<b>Rango</b>
Numero de Froude de la masa deslizante	$0.86 \leq F_s \leq 6.83$
Espesor relativo	$0.09 \leq S_s \leq 1.64$
Masa relativa	$0.11 \leq M_s \leq 10.02$
Densidad relativa	$0.59 \leq \rho_s/\rho_w \leq 1.72$
Volumen relativo	$0.05 \leq V_s/(bD^2) \leq 5.94$
Porosidad de la masa deslizante	$30.7\% \leq n \leq 43.3\%$
Ángulo promedio de la ladera	$30^\circ \leq \omega \leq 90^\circ$
Ancho relativo	$0.74 \leq b/D \leq 3.33$
Distancia radial relativa	$5 \leq r/D \leq 30$
Ángulo de propagación de la ola	$-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$
Producto de impulso	$0.17 \leq P \leq 8.13$

**Tabla 2.3.2:** Limitaciones para el cálculo de olas generadas por deslizamientos [3].

### 2.3.2.2. Propagación de la ola

La altura de la ola en cualquier punto del embalse ( $h_w$ ) para  $r > x_M$  puede ser determinada mediante la siguiente ecuación [3]:

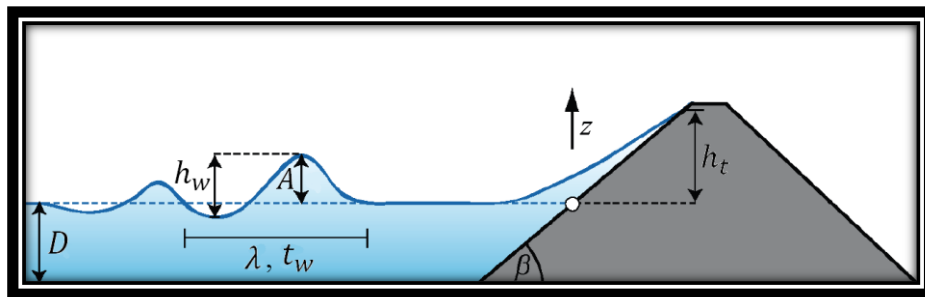
$$h_w = \frac{3}{2} P^{4/5} \cos^2 \left( \frac{2\gamma}{3} \right) \left( \frac{r}{D} \right)^{-2/3} D \quad (2.3.13)$$

Donde:

- $h_w$  La altura de la ola (en cualquier punto del embalse) [m]
- $P$  Producto del impulso
- $\gamma$  Angulo de propagación de la ola [°]
- $r$  Distancia radial desde la zona de impacto [m]
- $D$  Profundidad de agua en el embalse (en la zona de impacto) [m]

### 2.3.2.3. Altura de trepada de la ola

La figura 2.3.4 muestra los parámetros relevantes para la determinación de la altura de trepada de la ola sobre el talud de la presa aguas arriba:



**Figura 2.3.4:** Parámetros que rigen la determinación de la altura de trepada de la ola. [3]

Para determinar la altura de trepada de la ola sobre la cara del talud de la presa, Müller [16] la define mediante la siguiente expresión:

$$h_t = 1.25 \left( \frac{h_w}{D} \right)^{5/4} \left( \frac{h_w}{\lambda} \right)^{-3/20} \left( \frac{90^\circ}{\beta} \right)^{1/5} D \quad (2.3.14)$$

Donde:

- $h_t$  Altura de trepada de la ola [m]



$h_w$	Altura de la ola (frente a la presa) [m]
$D$	Profundidad de agua (frente a la presa) [m]
$\lambda$	Longitud de la ola (frente a la presa) [m]
$\beta$	Angulo del el talud aguas arriba de la presa [°]

La longitud de la ola frente a la presa ( $\lambda$ ) viene dada por:

$$\lambda = t_w c \quad (2.3.15)$$

$$t_w = 15 \left( \frac{h_w}{D} \right)^{1/4} \left( \frac{D}{g} \right)^{1/2} \quad (2.3.16)$$

$$c = \sqrt{g(D + A)} \quad (2.3.17)$$

$$A = \frac{4}{5} h_w \quad (2.3.18)$$

Donde:

$\lambda$	Longitud de la ola (frente a la presa) [m]
$t_w$	Periodo de la ola (frente a la presa) [s]
$c$	Velocidad de avance de la ola (frente a la presa) [m/s]
$h_w$	La altura de la ola (frente a la presa) [m]
$g$	Aceleración de la gravedad; $g = 9.81m/s^2$
$D$	Profundidad de agua en el embalse (frente a la presa) [m]
$A$	Amplitud de la ola (frente a la presa) [m]

La altura de trepada de la ola (ecuación 2.3.14) ha sido obtenida mediante ensayos sobre taludes de superficies lisas, por lo tanto este valor debe ser atenuado en caso de requerir análisis de trepada de la ola sobre superficies rugosas.

En la tabla 2.3.3 se muestran las limitaciones para el cálculo de la altura de trepada de la ola:

Termino	Rango
Altura relativa de la ola	$0.011 \leq h_w/D \leq 0.521$
Pendiente de la ola	$0.001 \leq h_w/\lambda \leq 0.013$
Angulo Relativo del talud	$1.0 \leq 90^\circ/\beta \leq 4.9$

**Tabla 2.3.3:** Limitaciones para el cálculo de la altura de trepada de la ola. [3]

### 2.3.3. Sismo

Las aceleraciones sísmicas, al actuar sobre el embalse, generan oscilaciones del agua almacenada. La probabilidad de que la amplitud de tales oscilaciones represente un peligro de desbordamiento es baja, debido a que los periodos de excitaciones sísmicas son siempre mucho menores que las oscilaciones naturales de los embalses y la duración de los sismos no es suficientemente larga para generar una serie de oscilaciones del embalse en fase con las del sismo. Ambos hechos prácticamente eliminan la posibilidad de grandes amplificaciones del movimiento [10].

## 2.4. Parámetros considerados en la determinación del bordo libre

### 2.4.1. Laminación de diseño para el aliviadero

La lámina de diseño depende del tipo de aliviadero y la creciente transitada, debido a que el aliviadero o vertedero de excesos debe evacuar con facilidad la creciente de diseño, la cual definen en función del periodo de retorno ( $T_r$ ).

Por lo tanto una vez determinada la creciente de diseño afluente al embalse, con el dimensionamiento del vertedero se definirá el nivel de aguas máxima (NAM).

### 2.4.2. Altura de la ola

La altura de la ola depende de la amplitud y longitud de la onda producida por el viento, deslizamiento o por la acción del sismo; y estas a su vez dependen del Fetch y de la máxima velocidad probable de viento.

En la tabla 2.4.1 el USBR (United States Bureau of Reclamation) establece alturas de ola según la velocidad del viento y el Fetch.

<b>Fetch</b> [km]	<b>Velocidad del viento</b> [km/h]	<b>Altura de las olas</b> [m]
1.6	80	0.8
1.6	120	0.9
4	80	1
4	120	1.1
4	160	1.2
8	80	1.15
8	120	1.3
8	160	1.45
16	80	1.4
16	120	1.65
16	160	1.85

**Tabla 2.4.1:** Altura de olas [13]

Estudios actuales indican que la altura máxima de las olas debido a la acción del sismo, resulta menor que la producida por vientos fuertes (ciclones o huracanes que son comunes en la parte de México), excepto en casos de resonancia, cuya probabilidad es incierta. Además sugieren se tome en cuenta también oleajes debido a deslizamientos en los taludes naturales en el embalse [10].

### **2.4.3. Altura de trepada de la ola**

La inclinación del talud y el revestimiento del mismo influyen sobre la altura a la que la ola sube sobre el mismo. Sobre un talud de piedra a volteo la energía de la ola se amortigua mucho antes que sobre un revestimiento de losas de hormigón. Sin embargo, no existen datos exactos sobre esta cuestión y por tanto el Ingeniero debe limitarse a una estimación. Para la determinación de este parámetro, cada uno de los criterios (inciso 2.5) definirá como estimarlo.

### **2.4.4. Remanso**

Es el aumento de nivel del agua al soplar el viento constantemente en una dirección, produciendo una elevación de los niveles de agua próximos a la presa. Y es mayor en cuanto menor sea la pendiente del cauce y mayor la altura de agua en el embalse.

#### 2.4.5. Marea

La marea terrestre es la elevación del nivel de agua en lagos y embalses debida principalmente a la atracción gravitatoria entre el Sol, la Luna y la Tierra. A diferencia de las mareas oceánicas, las mareas terrestres son pequeñas y no pueden ser observadas directamente con facilidad.

#### 2.4.6. Seiches

Un embalse que tiene una gran dimensión horizontal tiene un largo periodo natural de oscilación y se sospecha que algunos tipos de sismos, los cuales contienen un largo período entre desplazamientos de tierra bastante grandes, pueden iniciar en todo el cuerpo de agua un movimiento de balanceo relativamente lento con magnitud apreciable. Este tipo de movimiento se conoce comúnmente como Seiche. Es muy posible que, en la peor combinación de condiciones, esta acción pudiera causar que una gran cantidad de agua del embalse se vierta sobre la parte superior de la presa [5].

#### 2.4.7. Asentamientos de la presa

Los asentamientos ocurren en la presa y en la cimentación debido a causas tales como:

- ❖ **Cargas Estáticas.**- Es el asentamiento causado por el peso propio del terraplén y se debe a la compactación inadecuada de la presa, preparación incorrecta de la fundación y empleo de materiales de mala calidad. Sin embargo, la consolidación del terraplén se produce mayormente durante la construcción y antes que se termine el terraplén, por lo cual se debe prestar mayor interés al asentamiento por consolidación del cimiento.
- ❖ **Cargas Dinámicas.**- Es el asentamiento causado por un sismo y debería ser considerado en la determinación del bordo libre. Sin embargo, la probabilidad de que un sismo de gran magnitud coincida con la avenida máxima del proyecto es extremadamente remota [7].

Marsal y Reséndiz [10] analizan la pérdida de bordo libre por asentamiento en presas de tierra sujetas a la acción sísmica, y concluyen que se debe a la densificación del terraplén, lo cual aclara que dicho mecanismo puede casi anularse con los métodos y equipos modernos de construcción.

### 2.4.8. Altura de seguridad

Una altura de seguridad (medida verticalmente desde la altura de trepada de la ola) se selecciona de acuerdo a la categoría según lo establece la tabla 2.4.2:

Categoría	Altura adicional (m)
IV	0.50 – 0.60
III	0.60 – 0.75
II	0.70 – 0.90
I	0.80 – 1.00

Tabla 2.4.2: Altura adicional según la categoría. [6]

## 2.5. Criterios para estimar el bordo libre

### 2.5.1. Según Experiencia Cubana

El bordo libre Normal o Mínimo se define a partir de la cota de corona, la cual se obtiene del mayor resultado entre las fórmulas 2.5.1 y 2.5.2. Este criterio toma en consideración tanto el nivel de agua normal (NAN) como el nivel de agua máximo (NAM). Los niveles indicados se obtienen a partir de estudios hidrológicos, hidráulicos y topográficos, los cuales definen la avenida de diseño y dimensionamiento del vertedero de excesos.

$$Cota\ de\ Corona = NAN + h_t + R + a \quad (2.5.1)$$

$$Cota\ de\ Corona = NAM + h_t + R + a \quad (2.5.2)$$

Donde:

*NAM* Nivel de agua máxima en el embalse

*NAN* Nivel de agua normal en el embalse

*h<sub>t</sub>* Altura de trepada de la ola

*R* Remanso

*a* Altura de seguridad

En base a estos niveles y categoría de la obra (Tabla 2.5.1) se definen probabilísticamente las velocidades de viento, altura y longitud de olas:





Categoría de presas	Descripción
I	Embalse donde una ruptura pondría peligro vidas en una comunidad.
II	Embalse donde una ruptura: a) No pondrá en peligro vidas en una comunidad. b) Generará un daño excesivo.
III	Embalses donde una ruptura implicará riesgo mínimo a seres vivientes y causara daño limitado.
IV	Casos especiales donde no se pronostica pérdida de vidas como resultado de una ruptura y se causara daño muy limitado debido a inundación adicional.

**Tabla 2.5.1:** Categoría de Presa [18].

- ❖ Para el cálculo de la cota de corona a partir del NAN se considera la probabilidad de ocurrencia de la máxima velocidad de viento, según su categoría tal como se indica en la tabla 2.5.2:

Categoría	Probabilidad
I y II	2%
III y IV	4%

**Tabla 2.5.2:** Categoría de la obra vs Probabilidad de ocurrencia de viento máximo. [6]

- ❖ Para el cálculo de la cota de corona a partir del NAM se toma la probabilidad de ocurrencia del 50% de su máxima velocidad de viento, debido a que es mínima la ocurrencia que se den simultáneamente máximo nivel de agua y máxima velocidad de viento.

En la estimación del bordo libre, se consideran los siguientes parámetros:

- ❖ **Altura de ola ( $h_w$ ) y longitud de la ola ( $\lambda$ )** en los embalses, primero se determina altura y longitud de la ola máximos, es decir para una probabilidad de ocurrencia del 1%, mediante las siguientes expresiones:

$$h_{1\%} = 0.081K * V_v * \sqrt{F * \epsilon} \tag{2.5.3}$$

$$K = 1 + e^{\left(\frac{-0.4F}{V_v}\right)} \tag{2.5.4}$$

$$\epsilon = \frac{1}{9 + 19 * e^{\frac{-14}{V_v}}} \tag{2.5.5}$$

$$\lambda_{1\%} = 10 * h_{1\%} \tag{2.5.6}$$

Donde:

$h_{1\%}$  Altura de ola para probabilidad de ocurrencia de 1% [m]

$V_v$  Velocidad del viento medida a 10 m sobre el agua [m/s]

$F$  Fetch [km]

$\epsilon$  Pendiente de la ola

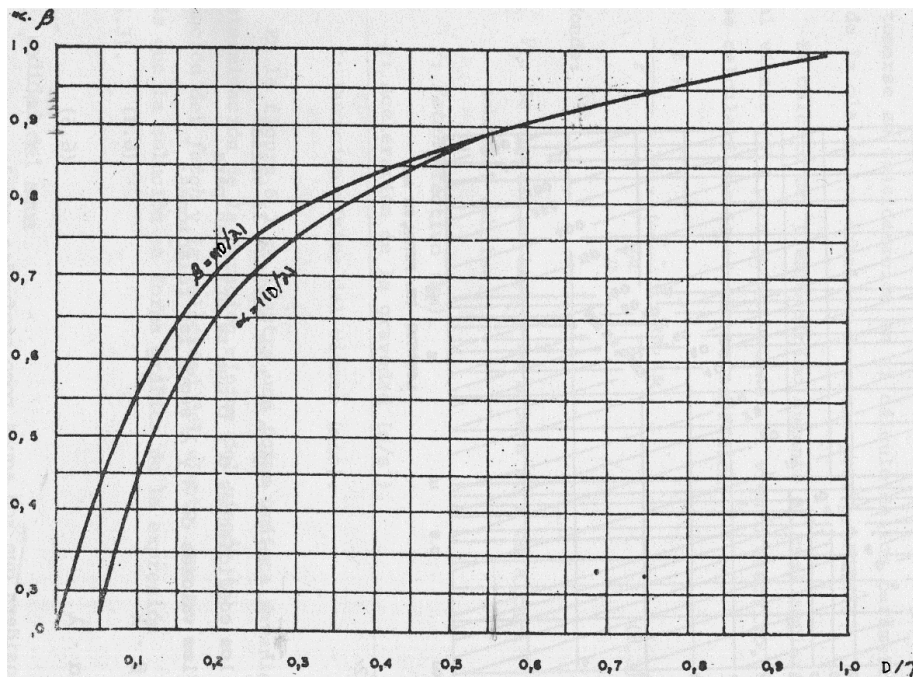
$\lambda_{1\%}$  Longitud de ola para probabilidad de ocurrencia de 1% [m]

La probabilidad para el cálculo de la altura de la ola está definida de acuerdo a la categoría y se observa en la siguiente tabla 2.5.3:

Categoría	Probabilidad de ocurrencia de la altura de la ola
IV	4%
III	3%
II	2%
I	1%

**Tabla 2.5.3:** Probabilidad de ocurrencia de la altura de la ola de acuerdo a la categoría de la obra. [6]

Obtenido los valores de  $h_w$  y  $\lambda$ , estos se corrigen de acuerdo a la profundidad de agua en el embalse ( $D$ ) mediante coeficientes  $\beta$  y  $\alpha$  respectivamente, los cuales se obtienen de la figura 2.5.1:



**Figura 2.5.1:** Curvas de relación profundidad media del embalse ( $D$ ) y longitud de la ola ( $\lambda$ ) vs parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  [6]



En caso que la relación  $D/\lambda > 1$ , se tomará valores de  $\alpha$  y  $\beta$  igual a uno y esto significa que las características de la ola no se verán interrumpidas por el embalse. Con las características de ola ( $h_w$  y  $\lambda$ ) obtenidos, se lleva a la probabilidad de diseño, multiplicando por los factores de la tabla 2.5.4 para el cálculo de la cota de corona:

Probabilidad	Factor de $h_w$ y $\lambda$
1	1
2	0.9
3	0.85
4	0.80
5	0.76
10	0.67
20	0.65
30	0.48
40	0.40

**Tabla 2.5.4:** Factores de altura y longitud de ola. [6]

❖ **Altura de trepada de la ola ( $h_t$ )** que se produce en el talud está definida por la siguiente fórmula:

$$h_t = \frac{4.5 * K_{rug} * h_w}{p * m} \tag{2.5.7}$$

Donde:

- $h_w$  Altura de la ola para la probabilidad de diseño [m]
- $p$  Coeficiente que depende de la utilización de parapetos en la corona, indicada en la tabla 2.5.5:

p	Parapeto
0.95	Cuando hay parapeto
1	Cuando no hay parapeto

**Tabla 2.5.5:** Factor de parapeto. [6]

- $m$  Cotangente del talud aguas arriba de la presa
- $K_{rug}$  Factor que depende del tipo de revestimiento y se obtiene de la tabla 2.5.6.

Tipo de revestimiento	$K_{rug}$
Hormigón asfáltico	1.00
Hormigón	0.90
Piedra colocada a mano	0.80
Piedra semi-acomodada	0.65
Piedra a volteo	0.55

**Tabla 2.5.6:** Factores de revestimiento del talud aguas arriba. [6]

- ❖ **Remanso** ( $R$ ) producido por el viento se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{0.01 * V_v^2 * F}{3 * g * D} \cos \theta \quad (2.5.8)$$

Donde:

- $F$  Fetch [km]
- $g$  Aceleración de la gravedad;  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
- $D$  Profundidad de agua en el embalse para NAN o NAM [m]
- $V_v$  Velocidad del viento [m/s]
- $\theta$  Ángulo que forma la dirección del viento con la dirección del Fetch [°]

- **Altura de seguridad** ( $a$ ) se obtiene de acuerdo a la categoría de la obra como se indica en la tabla 2.4.2.

Una vez descrito todos los parámetros, la cota de corona de mayor valor que se obtenga se define como cota de diseño para la presa de tierra en cuestión y por consiguiente los bordos libres mínimo (con respecto al NAM) y normal (con respecto al NAN).

### 2.5.2. Según USBR (United States Bureau of Reclamation)

Este criterio establece que tanto el bordo libre normal y el bordo libre mínimo deben ser evaluados para la determinación de la altura de la presa, escogiéndose el que dé una altura mayor. Además se indica que el bordo libre mínimo para presas de tierra no debe ser inferior a 3 pies (0.9 m).



### 2.5.2.1. Estudios de alcance limitado

En la tabla 2.5.7 se dan recomendaciones de bordo libre normal y mínimo para presas de tierra con revestimiento de piedra a volteo, donde no exista información acerca de velocidades de viento y cuando el financiamiento para el diseño preliminar sea limitado.

Fetch	BLN	BLM
[millas]	[pies]	[pies]
< 1	4	3
1	5	4
2.5	6	5
5	8	6
10	10	7

**Tabla 2.5.7:** Bordo Libre normal y mínimo recomendados en función del Fetch [7]

Para presas de tierra con revestimiento de concreto u otras superficies lisas, estos valores deben multiplicarse por un factor igual a 1.5.

Los valores del bordo libre normal están basados para una velocidad de viento de 100 millas/hora (62.5 km/h) y para el bordo libre mínimo de 50 millas/hora (31.2 km/h). El efecto de remanso no está considerado [7].

### 2.5.2.2. Estudios a detalle

Los diseñadores deben considerar los factores específicos del sitio donde se construirá la presa tales como: la configuración topográfica del embalse, la velocidad, duración, orientación y distribución estacional del viento, la laminación de la avenida de diseño, el tipo de revestimiento del talud aguas arriba de la presa y características del cimiento [7].

A continuación se enumeran las combinaciones de componentes que pueden ocurrir simultáneamente para la estimación del bordo libre normal y mínimo:

#### ❖ Bordo libre mínimo

Los siguientes componentes, cuando razonablemente puedan ocurrir simultáneamente, deben ser combinados para determinar el bordo libre mínimo total:

1. Altura de trepada de la ola generada por el viento ( $h_t$ ) y Remanso ( $R$ ) para un viento de velocidad moderada (porcentaje de la máxima velocidad de viento).
2. Mal funcionamiento del vertedero durante la avenida máxima ( $h_v$ ).
3. Asentamiento de la presa y/o del cimiento ( $\Delta H$ ).

4. Incertidumbres hidrológicas resultado de una inadecuada base de datos ( $h_i$ ).
5. Altura de trepada de la ola generada por deslizamientos y/o desplazamientos del volumen de agua en el reservorio ( $h_t$ ).

❖ **Bordo libre normal**

Se debe elegir el caso más desfavorable de las siguientes dos combinaciones:

1. Altura de trepada de la ola generada por el viento ( $h_t$ ) y Remanso ( $R$ ) para velocidad máxima de viento, y asentamiento de la presa y/o del cimiento ( $\Delta H$ )
2. Altura de trepada de la ola generada por deslizamientos y/o desplazamiento del volumen de agua en el embalse ( $h_t$ ), asentamiento de la presa y/o del cimiento ( $\Delta H$ ) y asentamiento de la presa y/o del cimiento para sismos de máxima probabilidad ( $\Delta H_E$ ).

A continuación se describen las formulaciones y valores asignados para cada uno de los componentes antes citados:

**a) Altura de trepada de la ola generada por el viento ( $h_t$ ) y remanso ( $R$ )**

❖ **Altura de trepada de la ola**

La altura de trepada de la ola generada por el viento ( $h_t$ ) para presas de tierra con revestimiento de piedra colocada a volteo se determina mediante la siguiente expresión:

$$h_t = \frac{h_s}{0.4 + \left(\frac{h_s}{\lambda}\right)^{0.5} m} \quad (2.5.9)$$

Donde:

- $h_s$     Altura significativa de la ola [pies]
- $\lambda$     Longitud de la ola [pies]
- $m$     Cotangente del talud aguas arriba de la presa

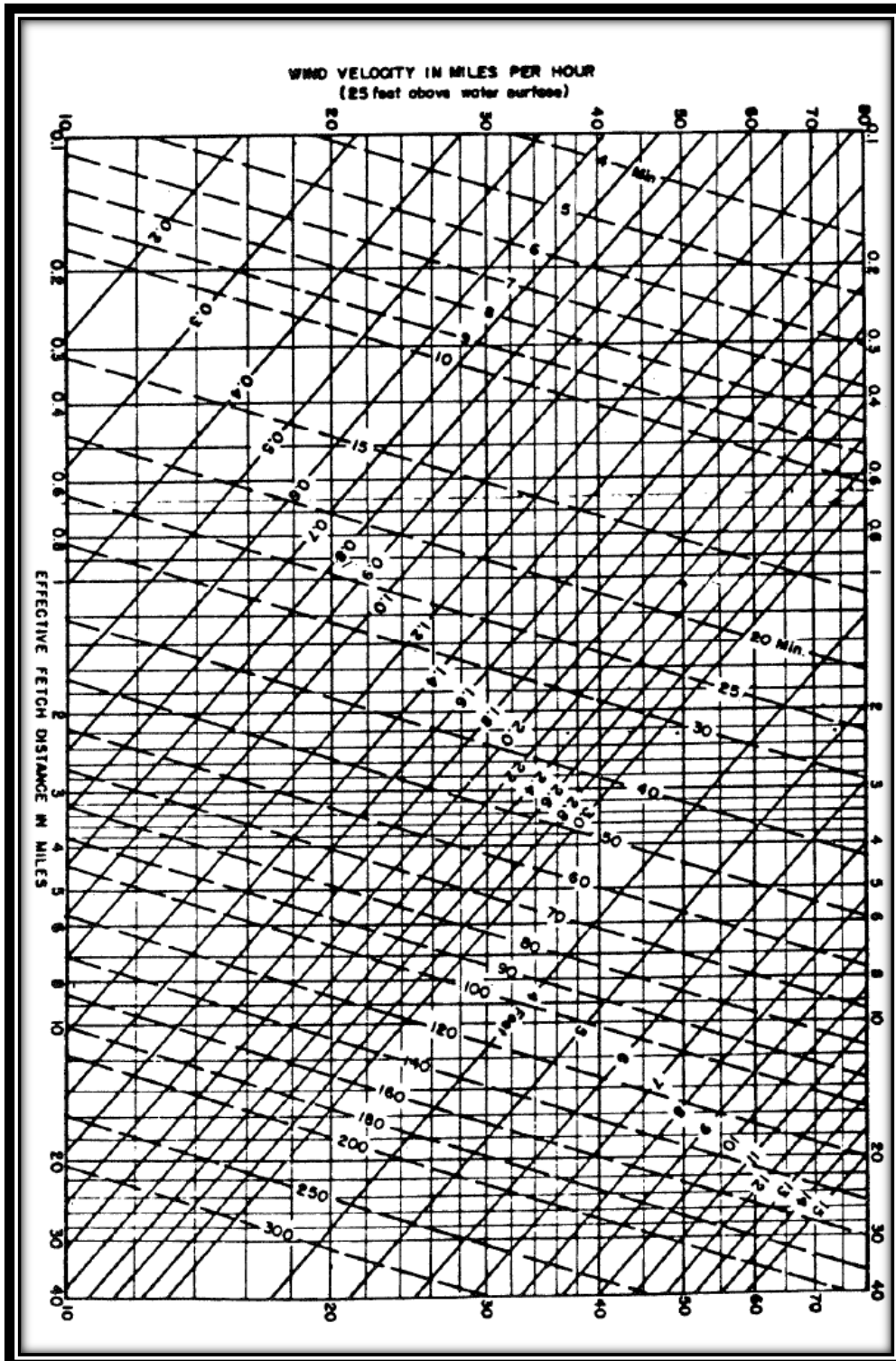
Para presas de tierra con revestimiento de concreto u otras superficies lisas, la ecuación (2.5.9) debe ser multiplicada por un factor de 1.5.

La altura significativa de la ola ( $h_s$ ) puede determinarse mediante la figura 2.5.2 función de la velocidad del viento y el Fetch efectivo.

Donde:

- La línea continua representa la altura significativa de la ola, en pies.

- La línea discontinua representa la mínima duración del viento, en minutos, necesaria para el desarrollo completo de la ola.

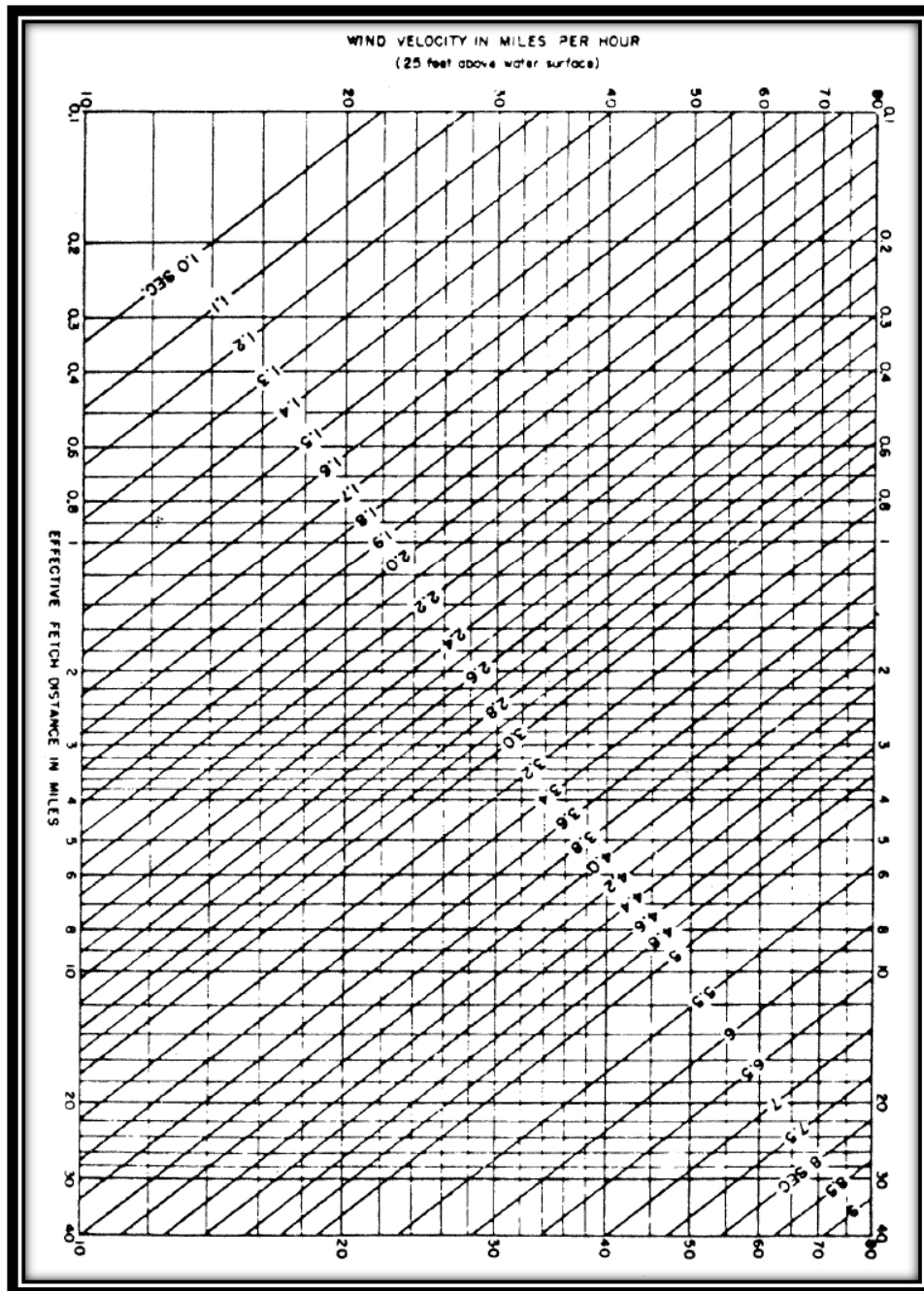


**Figura 2.5.2:** Relación entre la velocidad y duración del viento sobre la superficie de agua, y la altura significativa de la ola [7]

En la determinación del bordo libre normal, la altura significativa ( $h_s$ ) de la ecuación 2.5.9 se debe multiplicar por un factor igual a 1.27.

El periodo de la ola ( $t_w$ ) puede estimarse a través de la figura 2.5.3 y con este valor se obtiene la longitud de la ola ( $\lambda$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = 5.12t_w^2 \quad (2.5.10)$$



**Figura 2.5.3:** La relación entre la velocidad de viento sobre la superficie de agua, Fetch efectivo y el periodo de la ola. [7]



### ❖ Remanso

El remanso ( $R$ ) se define por la ecuación 2.5.11, la cual es una modificación de la ecuación original desarrollada por los Ingenieros Holandeses en el Zuider Zee [19]:

$$R = \frac{V_v^2 F}{1400D} \quad (2.5.11)$$

Donde:

$R$	Remanso [pies]
$V_v$	Velocidad del viento sobre el embalse [millas/h]
$F$	Fetch [millas]
$D$	Profundidad media en el embalse [pies]

### b) Incertidumbre Hidrológica ( $h_i$ )

El valor de algunos parámetros hidrológicos se considera poco confiable por las siguientes causas:

- ❖ Periodo de información muy corto
- ❖ Discontinuidad y variabilidad de los registros.

Si se dan las condiciones que justifican que se incluya un bordo libre adicional por la incertidumbre hidrológica, dicho valor debe basarse en el criterio de los responsables del diseño de la avenida máxima [7].

### c) Altura de trepada de la ola generada por deslizamiento ( $h_t$ )

Las olas producidas por deslizamientos de ladera deben ser considerados solo si el embalse se encuentra en una zona de altas pendientes y cuando el material deslizante no pueda ser económicamente removido o estabilizado [7].

### d) Asentamiento de la Presa y del Cimiento

- ❖ La cantidad de bordo libre por asentamientos de la presa y del cimiento debidos a cargas estáticas ( $\Delta H$ ), debe estar basada en el juicio, pero rara vez seria más de 0.5 a 1 pies. Sin embargo, tal ajuste no debería ser considerado si se puede realizar una determinación exacta del asentamiento de la presa [7].
- ❖ El asentamiento causado por un sismo ( $\Delta H_E$ ) debería ser incluida solo en la determinación del bordo libre normal y cuando la presa se encuentre situada en una zona de gran actividad sísmica [7].

**e) Mal funcionamiento del Vertedero ( $h_v$ )**

Los vertederos sin compuerta de regulación son los menos afectados por un mantenimiento inadecuado y problemas de operación. Un bordo libre adicional para este caso no es necesario. En el caso de vertederos con compuerta de regulación se puede asignar un bordo libre adicional de 1 pie [7].

**2.5.3. Según Creager y Justin**

Según estos autores, el bordo libre mínimo sobre el máximo nivel esperado de agua en el embalse debe ser la suma de las alturas de la marea, seiches, remanso y la altura de las olas (que le proporcionarán un ascenso sobre el talud aguas arriba) más una altura de seguridad basada en el juicio.

$$BLM = h_t + R + S + M + a \tag{2.5.12}$$

Donde:

- $BLM$  Bordo libre mínimo [pies]
- $h_t$  Altura de trepada de la ola [pies]
- $R$  Remanso [pies]
- $S$  Seiches [pies]
- $M$  Marea [pies]
- $a$  Altura de seguridad [pies]

A continuación se describen las formulaciones y valores asignados para cada uno de los componentes:

❖ **Altura de trepada de la ola ( $h_t$ )**

Para la altura de trepada de la ola sobre el talud se recomienda un valor igual a  $1.4h_w$  para revestimiento de piedra colocada a volteo y  $1.5h_w$  para revestimiento de concreto [9].

Los autores proponen la siguiente ecuación para el cálculo de la altura de ola:

$$h_w = \frac{F^{0.37} V_v^{0.48}}{3.41} \tag{2.5.13}$$

Donde:

- $h_w$  Altura de la ola [pies]
- $V_v$  Velocidad del viento [millas/h]
- $F$  Fetch [millas]



❖ **Remanso** ( $R$ )

Para embalses de aguas profundas y pequeñas áreas, este efecto es pequeño, aunque puede ser considerado en la asignación del bordo libre. La ecuación 2.5.11 es el mejor medio disponible para estimar el remanso [9].

❖ **Seiches** ( $S$ )

Amplitudes de 0.5 pies (15 cm) pueden ocurrir fácilmente en embalses de tamaño moderado, pero no se dispone de información para calcular su magnitud [9].

❖ **Marea** ( $M$ )

Los movimientos de la marea son imperceptibles en las aguas continentales, el máximo para los grandes lagos son de menos de 1 pulgada (2.5 cm) [9].

**2.5.4. Según Linsley y Franzini**

El bordo libre lo definen como la altura a partir del nivel máximo del embalse (NAM) y la corona de la presa, es decir Bordo Libre Mínimo (BLM), el cual involucra alturas por remanso ( $R$ ) y oleaje, definido de la siguiente manera:

$$BLM = R + h_t + a \quad (2.5.14)$$

Donde:

- $R$  Remanso [pies]
- $h_t$  Altura de trepada de la ola [pies]
- $a$  Altura de seguridad [pies]

La estimación del bordo libre mínimo, consideran los siguientes parámetros:

- ❖ **Remanso** ( $R$ ) definida por la ecuación 2.5.11.
- ❖ **Altura de trepada de la ola** ( $h_t$ ) o también denominado escurrimiento hacia arriba, se obtiene de la figura 2.5.4 (en donde  $h_t$  está definido por  $z_r$  y  $h_s$  por  $z_w$ ), mediante la relación  $h_t/h_s$  la misma depende de la relación  $h_s/\lambda$  donde la longitud de la ola ( $\lambda$ ) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\lambda = 5.12t_w^2 \quad (2.5.15)$$

en donde el periodo de la ola ( $t_w$ ), está definida por la ecuación:

$$t_w = 0.46V_v^{0.44}F^{0.28} \quad (2.5.16)$$

Y la altura significativa ( $h_s$ ) por:

$$h_s = 0.034 V_v^{1.06}F^{0.47} \quad (2.5.17)$$

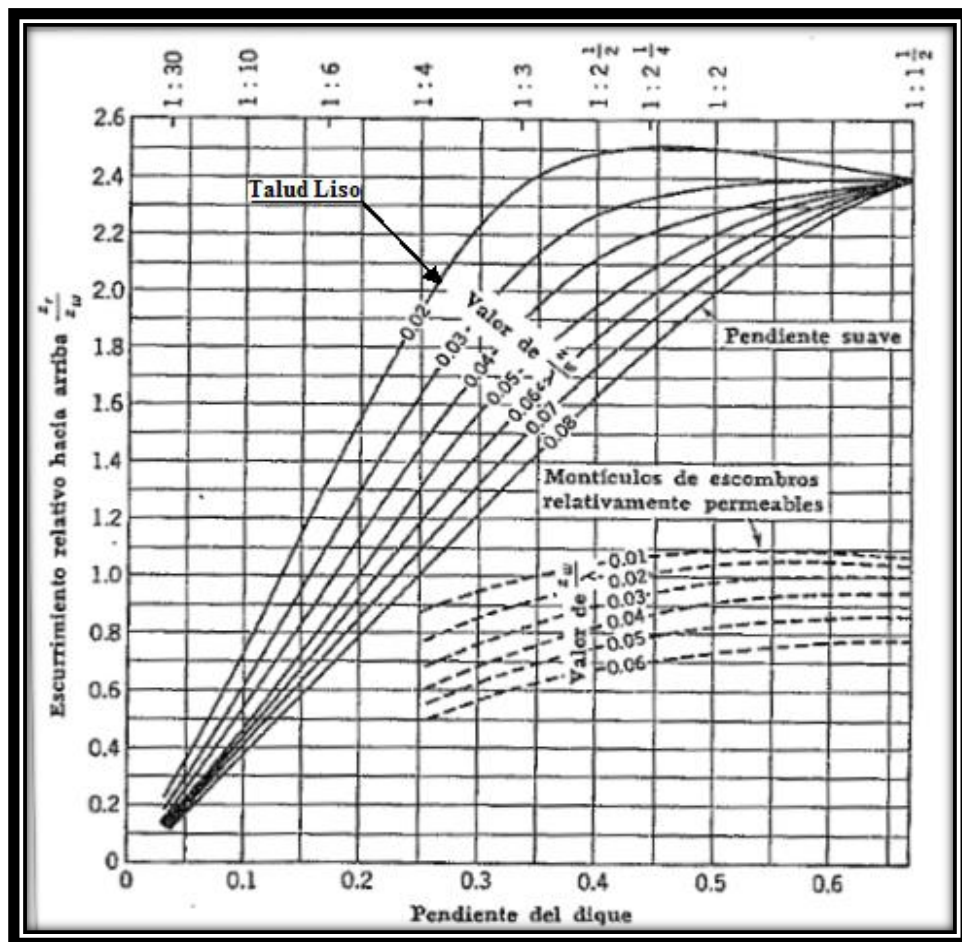
Donde:

$h_s$       Altura significativa de la ola [pies]

$V_v$       Velocidad del viento [millas/h]

$F$         Fetch [millas]

El valor ( $h_s$ ) esta medido desde el nivel de agua en reposo y el ascenso, si el talud está formado por roca a volteo, sería igual al de 50% de  $h_s$ .



**Figura 2.5.4:** Relaciones de la ola de escurrimiento hacia arriba (trepada de la ola) vs pendiente del Dique [19].

Las curvas para montículos de escombros representa una construcción extremadamente permeable y para zampeados más típicos en diques de tierra, la trepada de la ola algunas veces puede ser mayor, dependiendo en ambos casos, de la permeabilidad y de la relativa uniformidad de la superficie [8].

- ❖ **Altura de seguridad** ( $a$ ), recomiendan de 5 pies (1.5 m) para presas ubicadas en áreas consideradas de bajas temperaturas, ya que las heladas pueden causar grietas del suelo con filtraciones peligrosas. [8]

### 2.5.5. Según Gómez y Arancil

Estos autores plantean determinan el bordo libre mínimo de la siguiente manera:

$$BLM = h_t + a \quad (2.5.18)$$

Donde:

- $h_w$     Altura de la ola [m]
- $h_t$     Altura de trepada de la ola [m]
- $a$       Altura de seguridad [m]

A continuación se detallan los parámetros considerados:

- ❖ **Altura de la ola** ( $h_w$ ) definida por Stevenson y posteriormente mejorada por Molitor [20]:

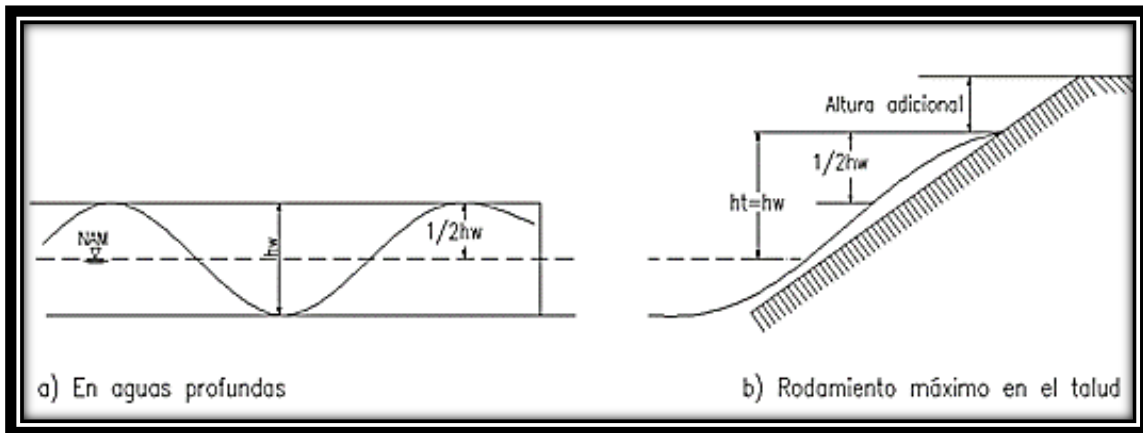
$$h_w = 0.76 + 0.032\sqrt{V_v F} - 0.24\sqrt[4]{F} \quad (2.5.19)$$

Donde:

- $V_v$     Velocidad del viento sobre el agua [m/s]
- $h_w$     Altura de ola [m]
- $F$       Fetch [km]

Esta fórmula se basó sobre observaciones en lagos, en los que las condiciones se parecen mucho a las de un embalse.

- ❖ **Altura de trepada de la ola** ( $h_t$ ), es suficiente suponer que la ola sube por el talud a una altura igual a  $\frac{h_w}{2}$ , y como la elevación de la cresta de la ola sobre el nivel medio es también  $\frac{h_w}{2}$ , la elevación total del agua en el talud sobre este nivel medio será  $h_w$  [2]. Por lo tanto  $h_t = h_w$  como se indica en la siguiente figura 2.5.5:



**Figura 2.5.5:** Características del oleaje

- ❖ **Altura de Seguridad** ( $a$ ) considera necesario un margen de seguridad de 1.5 m entre la cúspide de la máxima ola y la cota de corona.

### 2.5.6. Según Marsal y Reséndiz

El criterio determina el bordo libre mínimo a partir del nivel de agua máxima en el embalse (NAM) y se basa a partir de estudios de oleaje producido por vientos, definiéndose de la siguiente manera:

$$BLM = R + h_t + \Delta H_E \quad (2.5.20)$$

Donde:

- $BLM$  Bordo libre mínimo [m]
- $R$  Remanso [m]
- $h_w$  Altura de la ola [m]
- $h_t$  Altura de trepada de la ola [m]
- $\Delta H_E$  Asentamiento debido a acción sísmica [m]
- $a$  Altura de seguridad

A continuación se describen las formulaciones y valores asignados para cada uno de los componentes:

- ❖ **Remanso** ( $R$ ), la ecuación 2.5.11 transformada al sistema internacional de unidades (SI) se presentan a continuación:

$$R = \frac{V_v^2 F}{62000D} \quad (2.5.21)$$

Donde:

- $V_v$  Velocidad del viento (medida a una altura de 10 m) [km/h]
- $F$  Fetch [km]
- $D$  Profundidad de agua en el embalse [m]

- ❖ **Altura de la ola ( $h_w$ )**, definida por la ecuación 2.5.19
- ❖ **Altura de trepada de la ola ( $h_t$ )** se obtiene como se indica en la figura 2.5.6, en la cual se observa que varía de  $4/3h_w - 2h_w$ , dependiendo principalmente de la rugosidad del talud. Los valores extremos indicados corresponden respectivamente a taludes con protección de roca a volteo y con recubrimiento de concreto o similar [10]

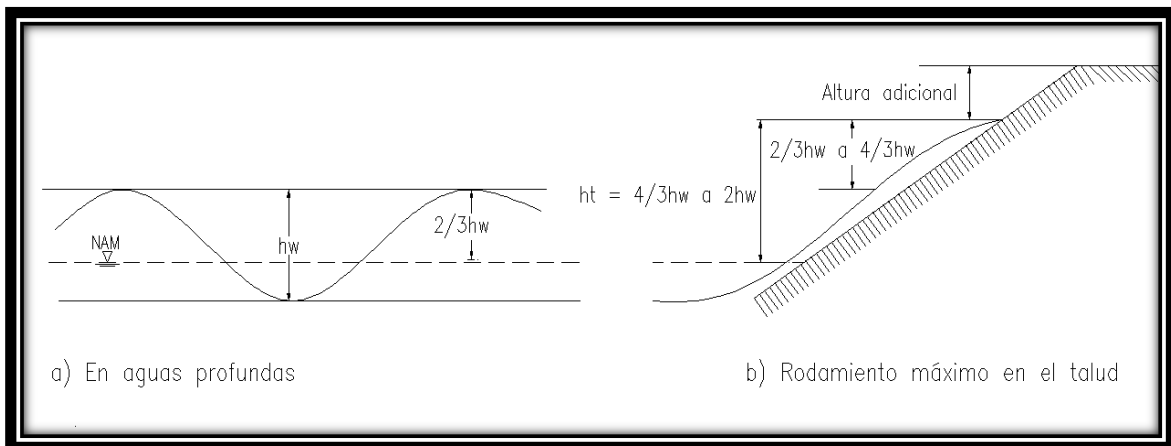


Figura 2.5.6: Características del oleaje [10].

- ❖ **Asentamientos por distorsión del terraplén bajo efectos sísmicos ( $\Delta H_E$ )**, se puede obtener a partir de la ecuación de Newmark y Rosenblueth cuya hipótesis supone el comportamiento de la presa rígido-plástico [21].

$$\Delta H_E = \frac{2v^2}{A_f} \left(1 - \frac{A_f}{K}\right)^2 \quad (2.5.22)$$

$$A_f = g * (\text{Cos}\beta * \text{tan}\phi - \text{sen}\beta) \quad (2.5.23)$$

$$K = 1230e^{0.8M_t}(R_t + 25)^{-2} \quad (2.5.24)$$

$$v = 15e^{M_t}(R_t + 0.17e^{0.59M_t})^{-1.7} \quad (2.5.25)$$

Para distancias focales del orden de 100 km o más, las ecuaciones 2.5.24 y 2.5.25 pueden aproximarse razonablemente por Esteva y Rosenblueth [22].

$$K = 2000e^{0.8M_t}R_t^{-2} \quad (2.5.26)$$

$$v = 16e^{M_t}R_t^{-1.7} \quad (2.5.27)$$

Donde:

$\Delta H_E$	Asentamiento debido a acción sísmica [cm]
$K$	Aceleración sísmica horizontal máxima [cm/s <sup>2</sup> ]
$v$	Velocidad máxima del suelo durante el sismo [cm/s]
$A_f$	Aceleración de fluencia del talud [cm/s <sup>2</sup> ]
$\phi$	Angulo de fricción interna del suelo [°]
$\beta$	Angulo de inclinación del talud [°]
$g$	Aceleración de la gravedad; $g = 9.81m/s^2$
$M_t$	Magnitud de temblor
$R_t$	Distancia focal a la estación donde interesa [km]

El asentamiento máximo  $\Delta H_E$  que se obtiene de la ecuación 2.5.22 se mide a lo largo del talud en cuestión. Debe analizarse para ambos taludes de la cortina y sumar los efectos; con la hipótesis de que los movimientos relativos entre las cuñas y el cuerpo de la cortina son independientes según los dos taludes, se introduce un error que probablemente en la práctica no sea excesivo [10].

### 2.5.7. Según Novak, Moffat, Nalluri y Narayanan

Los autores proponen un criterio para la estimación del bordo libre mínimo a partir del nivel máximo de agua en el embalse mediante la siguiente ecuación:

$$BLM = h_t + R + S \quad (2.5.28)$$

Donde:

$BLM$	Bordo libre mínimo [m]
$h_t$	Altura de trepada de la ola [m]
$R$	Remanso [m]
$S$	Seiches [m]



A continuación se describen las formulaciones y valores asignados para cada uno de los componentes:

❖ **Altura de trepada de la ola ( $h_t$ )**

Se basa en el concepto de la altura significativa de la ola ( $h_s$ ) la cual está definida en la figura 2.5.7 como *altura significativa de onda ( $H_s$ )* en función de la velocidad del viento y el Fetch efectivo definido como *Línea de agua efectiva*.

La ICE [18] recomienda el uso de una altura de ola para presas de tierra igual a:

$$h_w = 1.3h_s \quad (2.5.29)$$

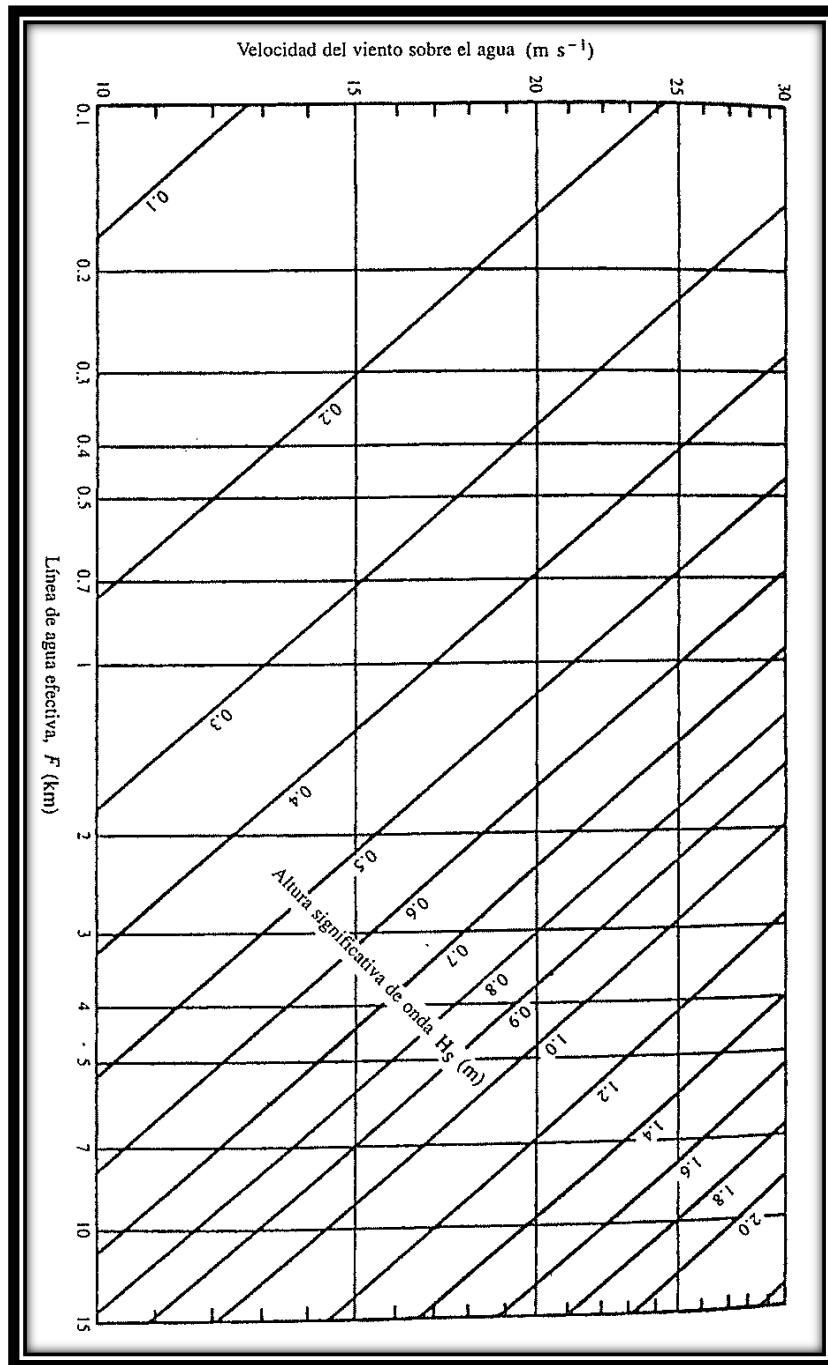
Para la altura de trepada de la ola sobre el talud con revestimiento de piedra colocada a volteo se recomienda un valor igual a  $1.5h_w$  y para revestimiento de concreto un valor igual a  $2h_w$ .

❖ **Remanso ( $R$ )**

Se determina por la ecuación 2.5.21

❖ **Seiches ( $S$ )**

Thomas [23] menciona valores de hasta 0.5 m de altura en presas grandes.



**Figura 2.5.7:** Relación entre el Fetch efectivo, la Velocidad del viento y la altura significativa de la ola [18]

### 2.5.8. Según Knappen

Este criterio estima altura máxima de la ola sin tomar en cuenta la máxima velocidad probable del viento, por consiguiente consideran que es constante para los diversos lugares de la tierra y se define por la fórmula:

$$BLM = 0.75h_w + \frac{c^2}{2g} \quad (2.5.30)$$

Para la obtención de altura de la ola ( $h_w$ ) se utiliza la fórmula de Stevenson [24]:

$$h_w = 0.76 + 0.34\sqrt{F} - 0.26^4\sqrt{F} \quad (2.5.31)$$

La fórmula de velocidad de la ola ( $c$ ) siempre y cuando la altura de ola dé valores entre 0.3 y 2.1 m se calcula con la siguiente ecuación [2].

$$c = 1.52 + 2h_w \quad (2.5.32)$$

Donde:

- $h_w$     Altura de la ola [m]
- $F$      Fetch [km]
- $c$      Velocidad de avance de la ola [m/s]

## Capítulo 3: Desarrollo

Los datos que se utilizarán como fuente para el presente trabajo son proporcionados por PROMAS (Programa de Manejo del Agua y del Suelo), los mismos que fueron obtenidos de estudios de Prefactibilidad y Factibilidad del proyecto Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la Provincia de Los Ríos (PACALORI).

### 3.1. Descripción y ubicación del proyecto

El Proyecto PACALORI permitirá la regulación de agua mediante un almacenamiento de agua durante el invierno y abastecimiento durante el verano para regar las tierras que no disponen de agua segura y perenne. El proyecto está constituido por trasvases, obras de toma, Presas de almacenamiento, vertederos y conducciones (figura 3.1.1).

Donde:

- ❖ Traslase 1: Quevedo – Macul. Derivación del Río Quevedo, Toma en la margen derecha del Río Quevedo.
- ❖ Traslase 2: Quevedo – Chojampe – Calabí – Lechugal – Aguacatal – Pueblo Viejo. Derivación del Río Calabí, Toma en la margen derecha del río Calabí.

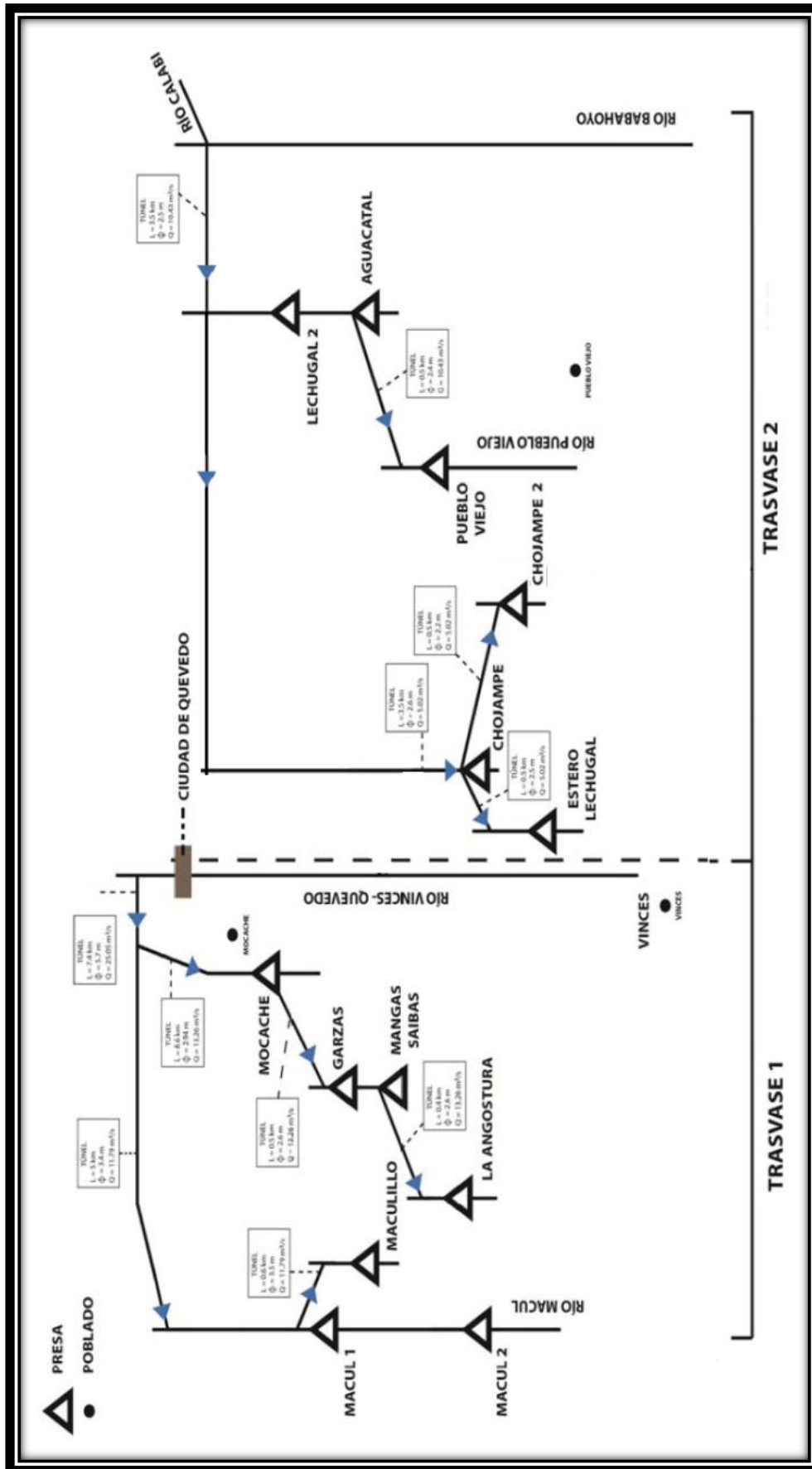
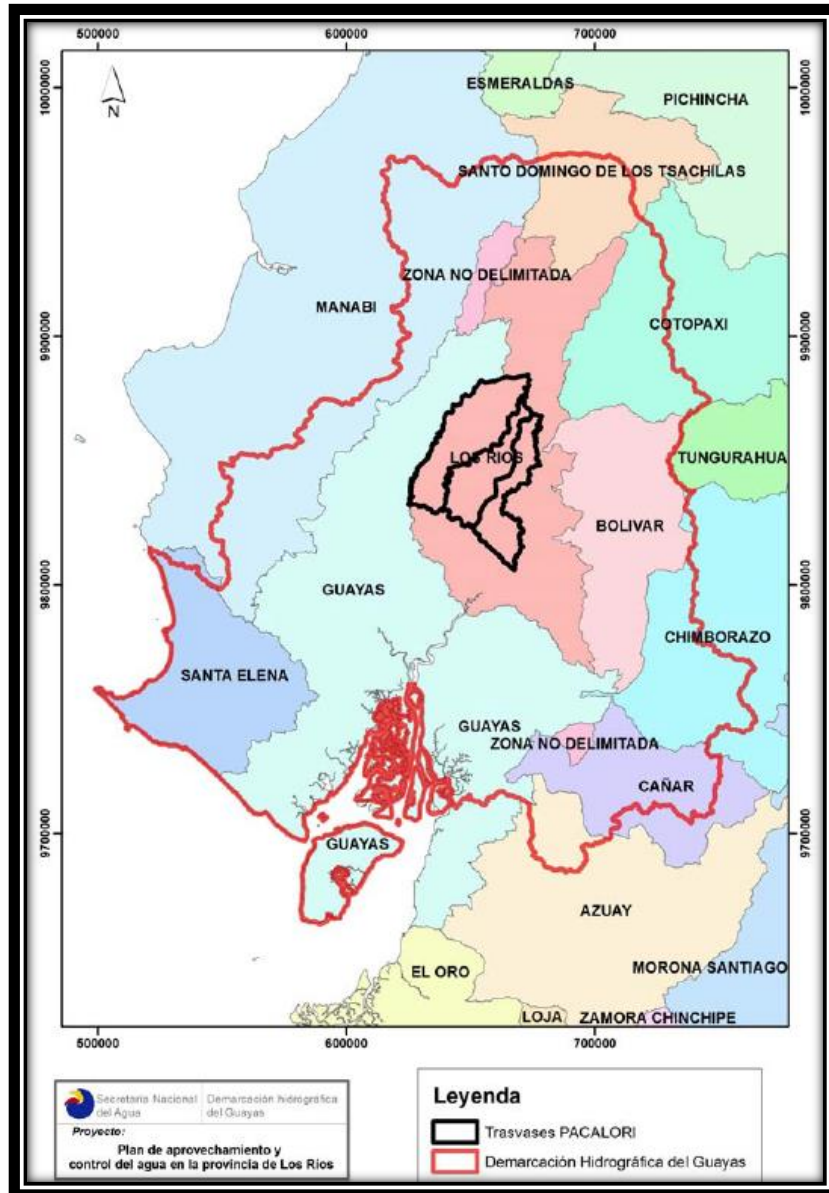


Figura 3.1.1: Esquema general del proyecto [27].

El proyecto PACALORI está ubicado al noroeste de América del Sur, en Ecuador, en la costa ecuatoriana Provincia de los Ríos, dentro de las siguientes coordenadas geográficas: N, 988158; al S, 9816844; al E, 678849; y al O, 624825 (ver figura 3.1.2). El cual ocupa una extensión de unos 1900 km<sup>2</sup> de los 8000 km<sup>2</sup> en la parte central de la cuenca del Rio Guayas al Sur de la ciudad de Quevedo, entre los ríos Daule y Catarama [27].



**Figura 3.1.2:** Ubicación del proyecto y demarcación hidrográfica del Río Guayas [28]

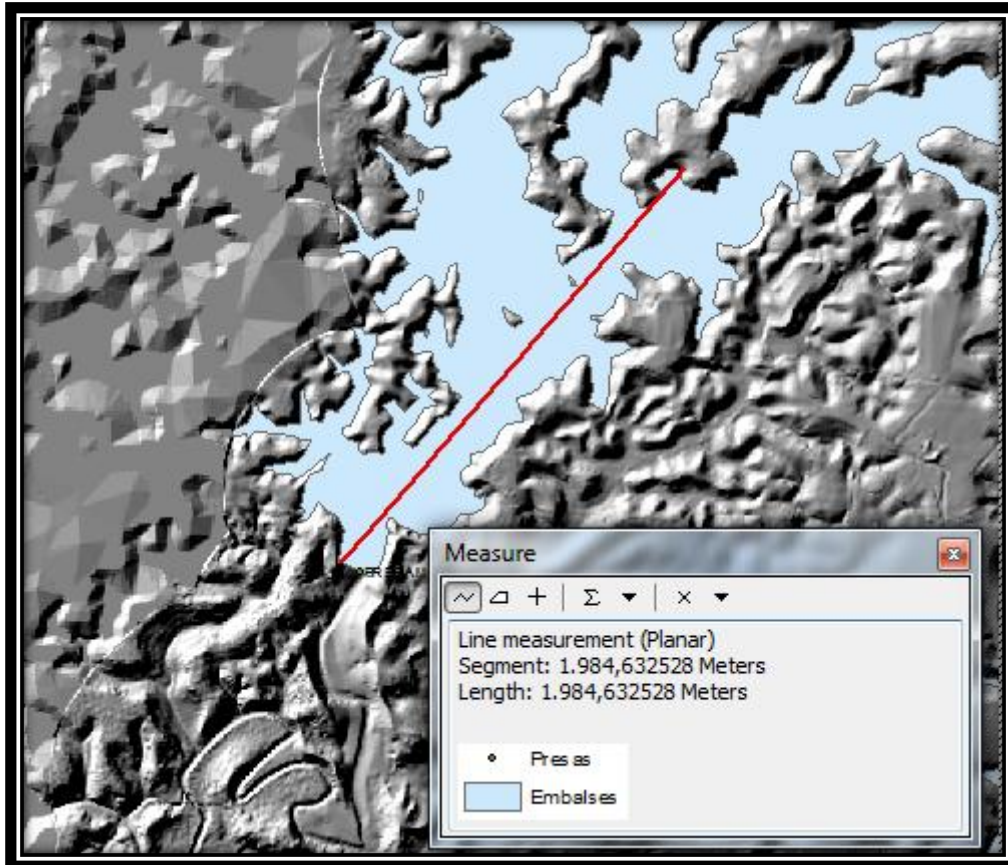
### 3.2. Condiciones Generales del sitio

#### 3.2.1. Topografía

Se cuenta con Mapas y Cartografía en general, escala 1:10000 con curvas de nivel cada 2 m; elaborados mediante SIG por la Unidad de Geomática de PROMAS. En el área del proyecto se observan superficies planas o

ligeramente onduladas con pendientes dominantes de 5 - 40% y con gargantas de ríos moderadamente encañonados.

A continuación se muestra un plano en planta del área de inundación a la altura de 18.9 metros desde el cimiento de la presa (nivel 38.9 msnm.).



**Figura 3.2.1:** Trazo del Fetch en Embalse Macul 1

A partir de la figura 3.2.1 se obtuvo la longitud de aplicación máxima del viento desde la presa hasta la orilla opuesta (Fetch) que tiene una distancia de 2 km.

### 3.2.2. Geología

El proyecto PACALORI se ubica en la cuenca del río Guayas, en la denominada llanura o planicie costanera, constituida geológicamente de secuencias sedimentarias, cuyas edades van del Plioceno al Cuaternario Reciente. En términos geológicos y morfológicos, esta llanura es una cuenca de sedimentación que puede asumirse como una cuenca sub-andina por su posición en el pie de la cordillera Occidental de los Andes. Los terrenos están constituidos de arenas, areniscas poco cementadas, capas de arcillas y tobas, cantos rodados en su mayoría de origen volcánico, con cobertura de proyecciones volcánicas de cenizas recientes. El área del proyecto se

considera una zona tectónicamente estable, no se encuentra fallas de importancia y esto se puede confirmar por los pocos eventos sísmicos de gran magnitud registrados en el área [29].

La presa **Macul 1** ha sido ubicada en un área donde dominan las terrazas indiferenciadas y aflora la formación geológica Balzar. Prácticamente, la totalidad del reservorio de la presa estará emplazada en terrazas indiferenciadas que son básicamente arcillosas y de importante espesor. No se han detectado en el embalse fallas geológicas que provoquen pérdidas de agua por infiltración o que causen inestabilidades [29].

### **Formación Balzar (Plioceno)**

La formación Balzar aflora en el sector de la cuenca del río Macul, que está cubierta en parte por terrazas indiferenciadas. Se presentan bancos de conglomerados, capas de areniscas de grano fino a medio, arcillas laminadas de color café con moluscos, restos de plantas silicificadas y mantos de arena y tobas [29].

### **Terrazas indiferenciadas (Pleistoceno)**

Constituyen bancos de arcilla y limo que se encuentran presentes en casi todo el valle, principalmente en las partes altas del río Macul. En determinados sitios se pueden encontrar depositaciones de suelo granulares arenosos [29].

En el sitio de presa se define una estructura de depositación normal según la cual las terrazas indiferenciadas descansan directamente sobre la formación Balzar que prácticamente es horizontal. No se han identificado, en consecuencia, otras estructuras derivadas del tectonismo, tales como sistemas de fallas o de plegamientos [29].

## **3.2.3. Climatología**

### **3.2.3.1. Viento**

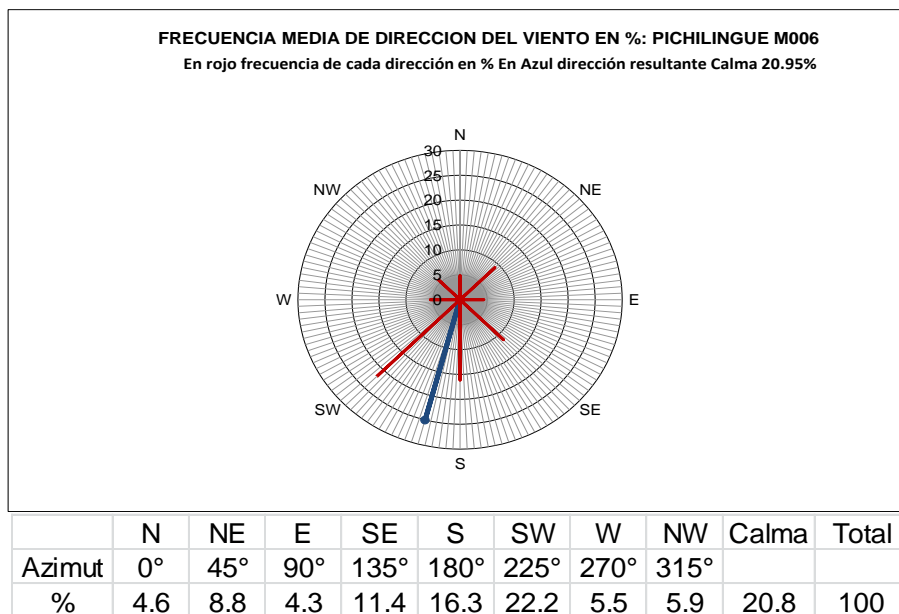
Del informe de Factibilidad sobre climatología-Hidrología-Sedimentología y Balance Hídrico [17], se obtuvo los datos de máxima velocidad de viento sugeridas como indican en la tabla 3.2.1. De la cual se trabajará con velocidad de viento de 55.2 km/h ( $V_t$ ) correspondiente a un periodo de retorno de 50 años obtenidos de los registros de la estación Pichilingue.



Tr	Velocidad Máxima
Años	km/h
2	21,8
3	25,1
5	29,3
10	35,7
20	43,2
25	45,9
50	55,2
100	66,3
200	79,6
500	101,4
1000	121,7

**Tabla 3.2.1:** Velocidades máximas del viento sugeridas para periodos de retorno (Tr) entre 2 y 1000 años. [17]

En lo que respecta a dirección del viento, se analizó los resultados de las estaciones Pichilingue M006 y Pueblo Viejo M172, por ser los más cercanos a la zona del proyecto, cuyos resultados son los siguientes:



**Figura 3.2.2:** Frecuencia de la dirección del viento en la estación Pichilingue M006 Período 1964-2010 [17]

En la figura 3.2.2 se indica el azimut promedio es de 195° (sentido horario). Para la estación Pueblo Viejo que tiene información incompleta y con vacíos en algunos años, se lo descartó. [17]

Por lo tanto las máximas velocidades de viento tienen dirección preferencial Suroeste, es decir contrarias a la dirección preferente de los flujos de los ríos en donde se ubicaran las presas, de tal modo el riesgo de oleajes por acción del viento se reduce.

En base al estudio de factibilidad [17] y suponiendo que el Fetch en los embalses se definen en la misma dirección del viento y a su vez el viento en la dirección preferente al flujo, entonces los resultados de bordo libre a obtener se considerarán del lado de la seguridad.

### 3.2.4. Hidrología

Con la hidrología se estima la producción de agua en cada una de las cuencas de los ríos hasta los sitios de las presas, y con ello obtener los niveles NAN y NAM los cuales se consideran determinantes para estimación del bordo libre.

Los resultados de NAN y NAM para el embalse Macul 1 son proporcionados por los estudios hidrológicos del PROMAS, los mismos que definen a partir de tres alternativas de longitud del vertedero. Por lo tanto para evaluar el bordo libre, se considerarán para las tres alternativas, como se indica en la tabla 3.2.2:

<b>Embalse Macul 1</b>			
<b>Longitud del Vertedero (m)</b>	L	0.67 L	0.5 L
	48	32	24
<b>NAN: Cota de Descarga (msnm)</b>	35	35	35
<b>H<sub>d</sub>: Nivel Máximo de Descarga (m)</b>	3,9	4	5,5

*Tabla 3.2.2: Niveles en el Embalse Macul 1*

### 3.2.5. Sismicidad

El registro de sismicidad en la región de la costa ecuatoriana indica que ha soportado pocos sismos destructores, los cuales han estado alejados del área de estudio.

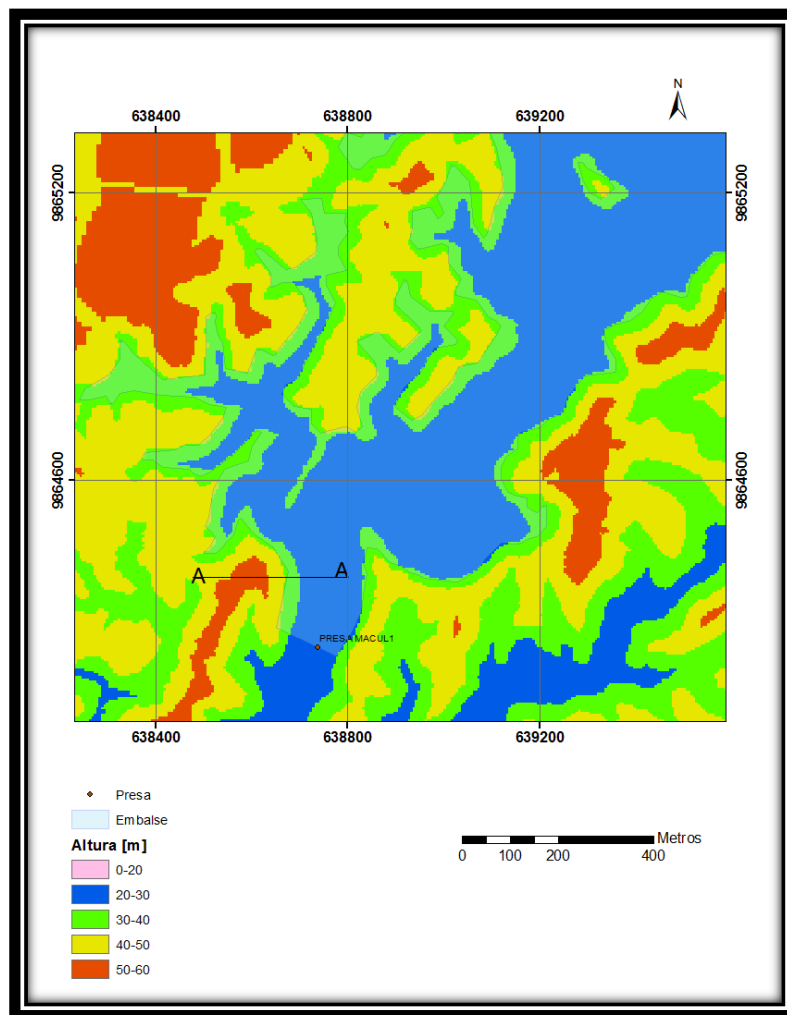
El criterio de Marsal y Reséndiz (inciso 2.5.6) evalúa el asentamiento de la cortina debido a sismo como altura adicional, caso muy improbable ya que los asentamientos de la cortina son comunes por consolidación. Entonces con información del PROMAS sobre "Sismos de magnitud Richter igual o mayor que 5, en un radio de 200 km alrededor del centro del proyecto" [29], tabla 3.2.3 se identificará el registro más crítico de sismo ocurrido en la cercanía de la zona del proyecto.

Sismos de magnitud Richter igual o mayor que 5, en un radio de 200 km alrededor del centro del proyecto						
Año	Mes	Latitud Sur	Longitud Oeste	Profundidad (km)	Magnitud Richter	(km) a Sitio
1924	10	2	80	33	6	89
1934	9	2.1	80	33	5.5	99
1937	9	0.5	80	33	6.4	99
1957		1.3	80.4	75	6	89
1961	7	2.1	79.4	33	6.2	92
1962	5	0.9	80.1	74	6.2	71

**Tabla 3.2.3:** Datos de sismo en un radio de 200km al rededor del Proyecto.

### 3.3. Cálculo de olas generadas por deslizamientos

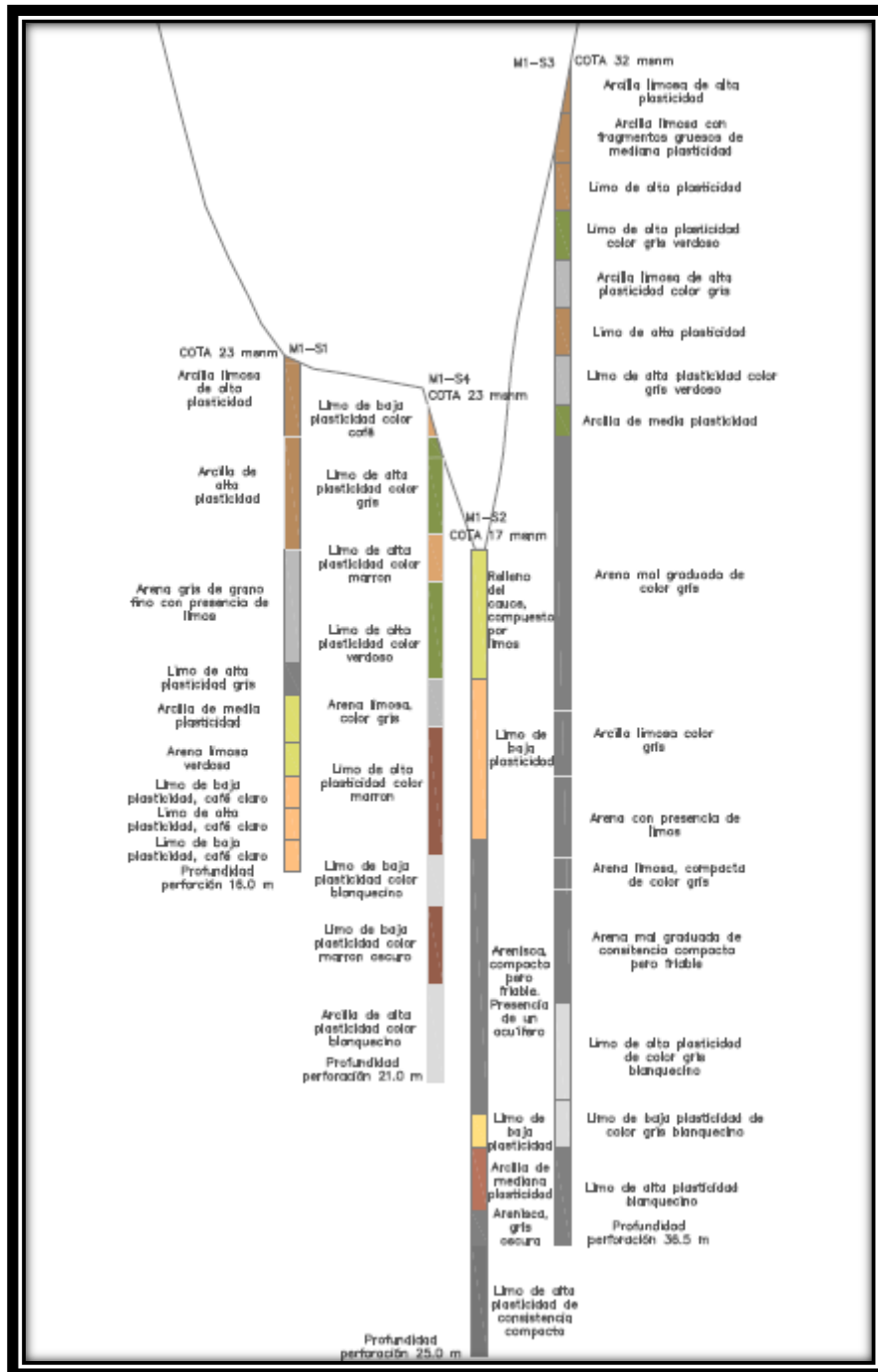
Para este estudio se analizará el efecto de olas generadas por deslizamiento con el fin de proveer una mayor confiabilidad en la estimación de bordo libre. En la figura 3.3.1 se observa que las zonas de mayor altura son las cercanas a la presa.



**Figura 3.3.1:** Mapa de alturas en el sitio de la presa Macul 1

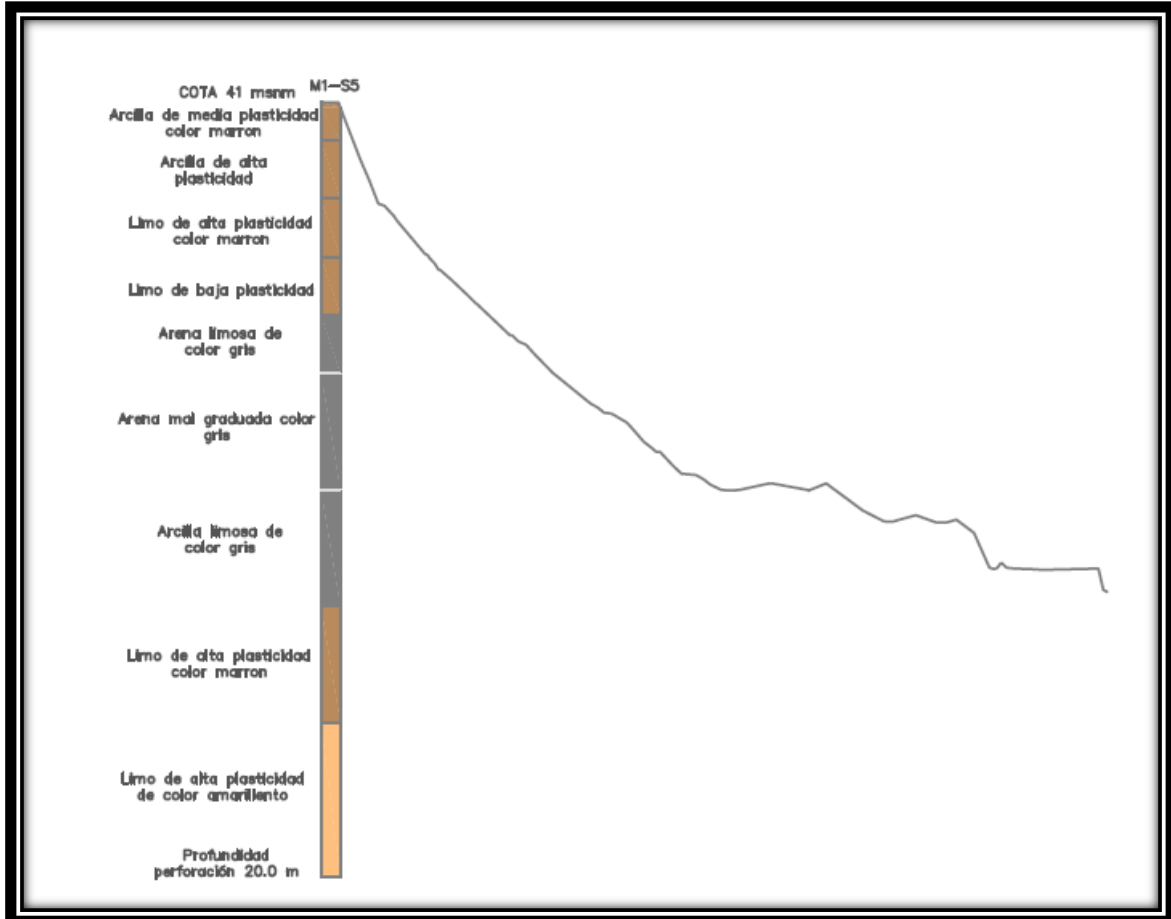
Con ayuda del programa ArcGIS se trazaron varios cortes en las laderas cercanas a la presa, identificado el corte A-A (ver figura 3.3.1) como el más desfavorable tomando en cuenta su pendiente, altura y distancia respecto a la presa.

A continuación se ilustra el perfil estratigráfico obtenido de las perforaciones realizadas en el sitio de la presa Macul 1 (ver figura 3.3.2):



**Figura 3.3.2:** Perfil estratigráfico en el sitio de la presa Macul 1

Se asume que todas las laderas que rodean al embalse Macul 1 son de material homogéneo conformado por arcilla limosa de alta plasticidad, definido por medio de perforaciones en el lugar en donde se pretende ubicar el vertedero de excesos, aproximadamente 435 m (en dirección Noreste) de la presa Macul 1. En la figura 3.3.3 se ilustra el perfil estratigráfico del vertedero de excesos.



**Figura 3.3.3:** Perfil estratigráfico en el vertedero de la presa Macul 1

Las propiedades físicas y mecánicas del material se indican a continuación:

Densidad húmeda	$\rho_s = 1700 \text{ kg/m}^3$
Cohesión	$C = 5000 \text{ kg/m}^2$
Ángulo de fricción interna	$\phi = 10^\circ$
Ángulo de reposo	$\delta = 20^\circ$
Porosidad	$n = 40\%$

Basándonos en la hipótesis de que ocurrirá un deslizamiento de la ladera sobre el embalse, procedemos a estimar las dimensiones de la masa deslizante suponiendo una superficie de deslizamiento plana, con un ángulo menor al de la ladera y que abarca toda la masa de suelo a partir del  $NAN = 35 \text{ msnm}$ . Dado que el ángulo promedio de la ladera es  $\omega = 19^\circ$ , el ángulo del plano de deslizamiento asumimos igual al ángulo de fricción interna  $10^\circ$ . Las dimensiones supuestas se indican a continuación:

Espesor de la masa deslizante	$s = 6 \text{ m}$
Ancho de la masa deslizante	$b = 40 \text{ m}$
Longitud de la masa deslizante	$l_s = 110 \text{ m}$
Altura de caída de la masa deslizante	$\Delta Z = 10 \text{ m}$
Ángulo de propagación de la ola	$\gamma = 90^\circ$
Distancia radial desde la zona de impacto	$r = 160 \text{ m}$
Profundidad de agua (en la zona de impacto)	$D = 12 \text{ m}$
Profundidad de agua (frente a la presa)	$D = 15 \text{ m}$

### Generación de la ola

Se calculó el efecto de esta masa deslizante sobre el embalse empleando las ecuaciones 2.3.1 a 2.3.12:

Velocidad de impacto de la masa deslizante	$V_s = 1 \text{ m/s}$
Volumen de la masa deslizante	$\forall_s = 29700 \text{ m}^3$
Numero de Froude de la masa deslizante	$F_s = 0.10$
Espesor relativo	$S_s = 0.50$
Masa relativa	$M_s = 7.79$
Densidad relativa	$\frac{\rho_s}{\rho_w} = 1.70$
Volumen relativo	$\frac{\forall_s}{bD^2} = 4.58$
Ancho relativo	$\frac{b}{D} = 3.33$
Distancia radial relativa	$\frac{r}{D} = 13.3$
Producto de impulso	$P = 0.11$

Según la tabla 2.3.2, el Número de Froude de la masa deslizante no satisface dicha condición, lo cual es debido a que la velocidad de impacto de la masa



deslizante es baja, y esto a su vez es debido a que la pendiente de la ladera es baja.

La altura máxima de la ola  $h_M = 1.1 m$  se produce a una distancia desde la zona de impacto de  $x_M = 22 m$  con una velocidad de avance de  $c_M = 11.3 m/s$  y una longitud de onda de  $\lambda_M = 37.3 m$ .

### Propagación de la ola

Mediante el empleo de la ecuación 2.3.13 se determinó la altura de la ola frente a la presa  $h_w = 0.1 m$ , la cuál es menor a la ola de máxima altura pero tiene mayor longitud de onda  $\lambda = 70 m$  debido a que la presa se encuentra ubicada a una distancia mayor al de la zona donde se produce la ola de altura máxima ( $r > x_M$ ) y esto hace que la energía de la ola se disipe a lo largo del embalse.

### Altura de trepada de la ola

Se calculó el efecto de la ola sobre el talud aguas arriba de la presa empleando las ecuaciones 2.3.14 a 2.3.18:

Altura relativa de la ola	$\frac{h_w}{D} = 0.011$
Pendiente de la ola	$\frac{h_w}{\lambda} = 0.002$
Angulo Relativo del talud	$\frac{90^\circ}{\beta} = 4.89$

La ola trepara una altura vertical de  $h_t = 0.2 m$  sobre el talud inclinado de la presa que tiene un ángulo igual a  $\beta = 18.4^\circ$ ; dicho valor corresponde al ascenso de la ola sobre una superficie lisa. Si se considera que el revestimiento de la presa será de piedra colocada a volteo, se asume que habrá una disminución de  $50\%h_t = 0.1 m$

## **3.4. Desarrollo de los diferentes criterios**

Para un mejor entendimiento de los criterios indicados en el inciso 2.5, a continuación se desarrollara cada uno de los criterios mencionados con datos para NAN y NAM, considerando longitud total del vertedero de excesos (datos a detalle en el inciso 3.3.4).

Para empezar, en todos los criterios, la velocidad máxima probable de viento definida en el inciso 3.3.3 de Climatología es obtenida sobre tierra, por lo tanto haciendo uso de la tabla 2.3.1 se llevara a velocidad de viento sobre el embalse (revisar inciso 2.3.1 sobre viento). Las velocidades de viento que se indicaran en los datos de cada criterio ya son transformados.

El revestimiento del talud aguas arriba se considerará piedra colocada a volteo.

❖ **Experiencia Cubana**

Datos		
<b>Categoría obra</b>	3	
<b>NAN</b>	35	m
<b>Hd</b>	3,9	m
<b>NAM</b>	38.9	m
<b>F (NAM)</b>	2	km
<b>F (NAN)</b>	2	km
<b>D (NAM)</b>	18.9	m
<b>D (NAN)</b>	15	m
<b>m</b>	3	
<b>Vv</b>	63.5	Km/h

- a) La probabilidad de ocurrencia de Velocidad de viento para categoría III en NAN es de 4% y para NAM es de 50%.

$$V_{v-NA} = \frac{(100 - \%p)V_v}{100}$$

$$V_{v-NAN} = \frac{(100 - 4) * 63.5}{100} = 61 \frac{km}{h} = 16.9 m/s$$

$$V_{v-NAM} = \frac{(100 - 50) * 63.5}{100} = 31.8 \frac{km}{h} = 8.8 m/s$$

- b) Altura y longitud de ola para la probabilidad de 1% de ocurrencia.

b.1) Para el NAN:

$$K = 1 + e^{-0.4(\frac{F}{V_v})} = 1 + e^{-0.4(\frac{2}{16.9})} = 1.95$$

$$\epsilon = \frac{1}{9 + 19 * e^{\frac{-14}{V_v}}} = \frac{1}{9 + 19 * e^{\frac{-14}{16.9}}} = 0.06$$

$$h_{1\%} = 0.081K * V_v * \sqrt{F * \epsilon} = 0.081 * 1.95 * 16.9 * \sqrt{2 * 0.06} = 0.93 m$$

$$\lambda_{1\%} = 10 * h_{1\%} = 10 * 0.92 = 9.3 m$$

b.2) Para NAM:

$$K = 1 + e^{-0.4(\frac{F}{V_v})} = 1 + e^{-0.4(\frac{2}{8.8})} = 1.91$$

$$\epsilon = \frac{1}{9 + 19 * e^{\frac{-14}{V_v}}} = \frac{1}{9 + 19 * e^{\frac{-14}{8.8}}} = 0.08$$



$$h_{1\%} = 0.081K * V_p * \sqrt{F * \epsilon} = 0.081 * 1.91 * 8.8 * \sqrt{2 * 0.08} = 0.54 \text{ m}$$

$$\lambda_{1\%} = 10 * h_{1\%} = 10 * 0.54 = 5.45 \text{ m}$$

- c) Ahora se corrige debido a la profundidad del agua en el embalse (D) las alturas y longitudes obtenidas:  
 Por cierto el criterio en cuestión define aguas poco profundas cuando  $D/\lambda \leq 0.5$

c.1) Para NAN

$$\frac{D}{\lambda} = \frac{15}{9.3} = 1.61 > 0.5 \quad (\text{Se esta en aguas profundas})$$

Con la relación 1.61 obtenida y la figura 2.5.1 se concluye que los valores  $\alpha$  y  $\beta$  son:

$$\alpha = \beta = 1$$

$$h_w = \beta * h_{1\%} = 1 * 0.93 = 0.93 \text{ m}$$

$$\lambda = \alpha * \lambda_{1\%} = 1 * 9.3 = 9.3 \text{ m}$$

c.2) Para NAM

$$\frac{D}{\lambda} = \frac{18}{5.45} = 3.29 > 0.5 \quad (\text{Se esta en aguas profundas})$$

Con la relación 3.47 obtenida y la figura 2.5.1 se concluye que los valores  $\alpha$  y  $\beta$  son:

$$\alpha = \beta = 1$$

$$h_w = \beta * h_{1\%} = 1 * 0.54 = 0.54 \text{ m}$$

$$\lambda = \alpha * \lambda_{1\%} = 1 * 5.45 = 5.45 \text{ m}$$

- d) Por último se corrige la altura y longitud de ola para la probabilidad de diseño:

Con la tabla 2.5.2 y la categoría de la presa III, la probabilidad de ocurrencia de altura de ola es de 3%. Con la probabilidad definida y la tabla 2.5.3 obtenemos el factor de corrección, siendo este de 0.85, por lo tanto:



d.1) Para NAN:

$$h_{w-3\%} = 0.85 * h_w = 0.85 * 0.93 = 0.79 \text{ m}$$

$$\lambda_{3\%} = 0.85 * \lambda = 0.85 * 9.3 = 7.91 \text{ m}$$

d.2) Para NAM:

$$h_{w-3\%} = 0.85 * h_w = 0.85 * 0.54 = 0.46 \text{ m}$$

$$\lambda_{3\%} = 0.85 * \lambda = 0.85 * 5.45 = 4.63 \text{ m}$$

e) Cotas de Corona

- Definido:
- $h_w$  y  $\lambda$
  - Recubrimiento del talud aguas arriba (piedra a volteo), y la tabla 2.5.5 el factor de recubrimiento es 0.55
  - Coeficiente de parapeto (tabla 2.5.4) es  $p=1$
  - Altura de seguridad (tabla 2.4.2) es  $a=0.7 \text{ m}$

Entonces la trepada de ola, remanso y cota de corona son:

e.1) Para NAN:

$$h_t = \frac{4.5 * K_{rug} * h_w}{p * m} = \frac{4.5 * 0.55 * 0.79}{1 * 3} = 0.65 \text{ m}$$

Se considera  $\theta = 0$  (suponemos coincide dirección del viento con el del fetch para estar del lado de la seguridad)

$$R = \frac{0.01 * V_v^2 * F}{3 * g * D} \cos \theta = \frac{0.01 * 16.9^2 * 2}{3 * 9.81 * 15} * 1 = 0.01 \text{ m}$$

La cota de corona se define por la fórmula 2.5.1:

$$Cota \text{ Corona} = NAN + h_t + R + a = 35 + 0.65 + 0.01 + 0.7 = 36.4 \text{ msnm}$$

e.2) Para NAM:

$$h_t = \frac{4.5 * K_{rug} * h_w}{p * m} = \frac{4.5 * 0.55 * 0.46}{1 * 3} = 0.38 \text{ m}$$

Se considera  $\theta = 0$  (suponemos coincide dirección del viento con el del fetch para estar del lado de la seguridad)



$$R = \frac{0.01 * V_v^2 * F}{3 * g * D} \cos \theta \frac{0.01 * 8.8^2 * 2}{3 * 9.81 * 18} * 1 = 0.003 \text{ m}$$

La cota de corona se define por la fórmula 2.5.2:

$$Cota \text{ Corona} = NAM + h_t + R + a = 38.9 + 0.38 + 0.003 + 0.7 = 39.1 \text{ msnm}$$

f) Cota de Corona definitiva, BLM y BLN

La experiencia cubana define como cota de corona a la mayor obtenida a partir del NAN o NAM, en este caso es a partir del NAM y es:

$$Cota \text{ de Corona (CC)} = 39.1 \text{ msnm}$$

$$Bordo \text{ Libre Normal (BLN)} = CC - NAN = 39.1 - 35 = 4.1 \text{ m}$$

$$Bordo \text{ Libre M\u00ednimo (BLM)} = CC - NAM = 39.1 - 38 = 1.1 \text{ m}$$

#### ❖ USBR

Datos	S. Internacional		S. Ingles	
<b>F (NAM)</b>	2	km	1.3	millas
<b>Vv</b>	63.5	km/h	39.7	millas/h
<b>NAN</b>	35	m	116.7	pies
<b>NAM</b>	38.9	m	129.7	pies
<b>D (NAN)</b>	15	m	50	pies
<b>D (NAM)</b>	18.9	m	63	pies
<b>m</b>	3		3	

#### Bordo Libre M\u00ednimo (BLM)

Los siguientes componentes han sido seleccionados de una manera razonable tomando en cuenta la posibilidad de que puedan ocurrir simult\u00e1neamente:

a) Altura de trepada de la ola generada por el viento ( $h_t$ ) para un viento de velocidad moderada (porcentaje de la m\u00e1xima velocidad de viento).

Para una velocidad de viento igual a  $V_v = 19.8 \text{ millas/h}$  (50% de la  $V_v$  m\u00e1xima) y un Fetch igual a  $F = 1.3 \text{ millas}$ , se puede estimar la altura significativa de la ola mediante la figura 2.5.2 igual a:  $h_s = 1 \text{ pies}$

El periodo de la ola puede estimarse a trav\u00e9s de la figura 2.5.3 igual a  $t_w = 2 \text{ s}$  y con este valor se obtiene la longitud de la ola mediante la siguiente ecuaci\u00f3n:  $\lambda = 5.12 t_w^2 = 5.12 * 2^2 = 20.5 \text{ pies}$

La altura de trepada de la ola para presas de tierra con revestimiento de piedra colocada a volteo se determina mediante la siguiente expresión:

$$h_t = \frac{h_s}{0.4 + \left(\frac{h_s}{\lambda}\right)^{0.5}} = \frac{1}{0.4 + \left(\frac{1}{20.5}\right)^{0.5} * 3} = 1 \text{ pies} = 0.3 \text{ m}$$

- b) Remanso ( $R$ ) para un viento de velocidad moderada (porcentaje de la máxima velocidad de viento)

$$R = \frac{V_v^2 F}{1400D} = \frac{19.8^2 * 1.3}{1400 * 63} = 0.006 \text{ pies} = 0.002 \text{ m}$$

- c) Asentamiento de la presa y del cimiento debido a cargas estáticas ( $\Delta H$ )

Se asume el máximo valor recomendado:

$$\Delta H = 1 \text{ pie} = 0.3 \text{ m}$$

Finalmente, el Bordo Libre Mínimo es igual a:

$$BLM = 0.3 + 0.002 + 0.30 = 0.6 \text{ m}$$

Pero, el Bordo Libre Mínimo no debe considerarse menor a 0.9 m, por lo tanto se asume un  $BLM = 0.9 \text{ m}$

$$Cota Corona (CC) = NAM + BLM = 38.9 + 0.9 = 39.8 \text{ msnm}$$

### Bordo Libre Normal (BLN)

- a) Altura de trepada de la ola generada por el viento ( $h_t$ ) para velocidad máxima de viento

Para una velocidad de viento igual a  $V_v = 39.7 \text{ millas/h}$  y un Fetch igual a  $F = 1.3 \text{ millas}$ , se estima la altura significativa de la ola igual a  $h_s = 2 \text{ pies}$ . El periodo de la ola igual a  $t_w = 2.6 \text{ s}$  y la longitud de la ola igual a  $\lambda = 5.12 * 2.6^2 = 34.6 \text{ pies}$

En la determinación de la altura de trepada de la ola se debe multiplicar por un factor igual a 1.27 a la altura significativa de la ola ( $h_s$ ):

$$h_t = \frac{1.27h_s}{0.4 + \left(\frac{1.27h_s}{\lambda}\right)^{0.5}} = \frac{1.27 * 2}{0.4 + \left(\frac{1.27 * 2}{34.6}\right)^{0.5} * 3} = 2.1 \text{ pies} = 0.6 \text{ m}$$



b) Remanso ( $R$ ) para velocidad máxima de viento

$$R = \frac{V_v^2 F}{1400D} = \frac{39.7^2 * 1.3}{1400 * 50} = 0.03 \text{ pies} = 0.01 \text{ m}$$

c) Asentamiento de la presa y del cimiento debido a cargas estáticas ( $\Delta H$ )

Se asume el máximo valor recomendado:

$$\Delta H = 1 \text{ pie} = 0.3 \text{ m}$$

Finalmente, el Bordo Libre Normal es igual a:

$$BLN = 0.6 + 0.01 + 0.30 = 0.9 \text{ m}$$

$$Cota \text{ Corona} = NAN + BLN = 35 + 0.9 = 35.9 \text{ msnm}$$

Por último, se elige el mayor valor:  $Cota \text{ Corona} (CC) = 39.8 \text{ msnm}$

$$BLN = CC - NAN = 39.8 - 35 = 4.8 \text{ m}$$

#### ❖ Creager y Justin

Datos	S. Internacional		S. Ingles	
<b>F (NAM)</b>	2	km	1.3	millas
<b>Vv</b>	63.5	km/h	39.7	millas/h
<b>NAN</b>	35	m	116.7	pies
<b>NAM</b>	38.9	m	129.7	pies
<b>D (NAM)</b>	15	m	50	pies
<b>D (NAM)</b>	18.9	m	63	pies
<b>m</b>	3		3	

a) Altura de trepada de la ola ( $h_t$ )

$$h_w = \frac{F^{0.37} V_v^{0.48}}{3.41} = \frac{1.3^{0.37} 39.7^{0.48}}{3.41} = 2 \text{ pies} = 0.6 \text{ m}$$

$$h_t = 1.4h_w = 1.4 * 0.6 = 0.8 \text{ m}$$



b) Remanso ( $R$ )

$$R = \frac{V_v^2 F}{1400D} = \frac{39.7^2 * 1.3}{1400 * 60} = 0.024 \text{ pies} = 0.007 \text{ m}$$

c) Seiches ( $S$ )

Se asume el máximo valor recomendado:

$$S = 0.5 \text{ pies} = 0.15 \text{ m}$$

d) Marea ( $M$ )

Del mismo modo, se asume el máximo valor recomendado:

$$M = 1 \text{ pulgada} = 0.025 \text{ m}$$

e) Altura de seguridad ( $a$ )

Se asume un valor de  $a = 0.7 \text{ m}$  de acuerdo a la tabla 2.4.2 para categoría de presa III.

Finalmente, el valor del bordo libre mínimo es:

$$BLM = 0.8 + 0.007 + 0.15 + 0.025 + 0.7 = 1.7 \text{ m}$$

$$Cota Corona (CC) = NAM + BLM = 38.9 + 1.7 = 40.6 \text{ msnm}$$

$$BLN = CC - NAN = 40.6 - 35 = 5.6 \text{ m}$$

#### ❖ Linsley y Franzini

Datos	S. Internacional		S. Ingles	
<b>F (NAM)</b>	2	km	1.3	millas
<b>Vv</b>	63.5	km/h	39.7	millas/h
<b>NAN</b>	35	m	116.7	pies
<b>NAM</b>	38.9	m	129.7	pies
<b>D (NAN)</b>	15	m	50	pies
<b>D (NAM)</b>	18.9	m	63	pies
<b>m</b>	3		3	



a) Remanso

$$R = \frac{V_v^2 F}{1400D} = \frac{39.7^2 * 1.3}{1400 * 63} = 0.02 \text{ pies}$$

b) Altura significativa de la ola ( $h_s$ ) la cual depende de la longitud de la ola ( $\lambda$ ):

$$t_w = 0.46V_v^{0.44}F^{0.28} = 0.46 * 39.7^{0.44} * 1.3^{0.28} = 2.5 \text{ seg.}$$

$$\lambda = 5.12t_w^2 = 5.12(2.5)^2 = 32 \text{ pies}$$

$$h_s = 0.034 V_v^{1.06} F^{0.47} = 0.034(39.7)^{1.06}(1.3)^{0.47} = 1.9 \text{ pies}$$

Ahora con la relación  $\frac{h_s}{\lambda} = \frac{1.9}{32} = 0.06$ , la pendiente de la presa  $\frac{1}{m} = \frac{1}{3} = 0.3$  y la figura 2.5.7 obtenemos una nueva relación  $\frac{h_t}{h_s} = 1.5$ , la misma que nos ayuda a determinar la altura de trepada de la ola para recubrimientos lisos:

$$h_t = 1.5h_s = 1.5 * 1.9 = 2.9 \text{ pies}$$

Pero para piedra a volteo es:

$$h_t = 0.5 * 2.85 = 1.5 \text{ pies}$$

c) Para la altura de seguridad menciona el criterio en cuestión para climas fríos, por ello se tomara de la tabla 2.4.2 en base a la categoría de presa la misma descrita en procedimiento Experiencia Cubana (Categoría III).

$$a = 0.7 \text{ m} = 2.3 \text{ pies}$$

d) Cota de corona (CC), BLM y BLN

$$BLM = 0.02 + 1.5 + 2.3 = 3.8 \text{ pies} = 1.1 \text{ m}$$

$$CC = NAM + BLM = 38.9 + 1.1 = 40 \text{ m}$$

$$BLN = CC - NAN = 40 - 35 = 5 \text{ m}$$



❖ **Gómez y Arancil**

Datos	S. Internacional	
<b>F (NAM)</b>	2	km
<b>Vv</b>	63.5	km/h
<b>NAN</b>	35	m
<b>NAM</b>	38.9	m
<b>D (NAM)</b>	15	m
<b>D (NAM)</b>	18.9	m
<b>m</b>	3	

a) Altura de la ola:

$$h_w = 0.76 + 0.032\sqrt{V_v F} - 0.24\sqrt[4]{F} = 0.76 + 0.032\sqrt{63.5 * 2} - 0.24\sqrt[4]{2} = 0.84 \text{ m}$$

b) Trepada de la ola

$$h_t = h_w = 0.84 \text{ m}$$

c) Altura adicional

Recomienda 1.5 m

d) BLM, BLN y Cota de Corona

$$BLM = h_t + a = 0.84 + 1.5 = 2.3 \text{ m}$$

$$Cota \text{ de Corona } (CC) = NAM + BLM = 38.9 + 2.3 = 41.2 \text{ msnm}$$

$$Bordo \text{ Libre Normal } (BLN) = CC - NAN = 41.2 - 35 = 6.2 \text{ m}$$

❖ **Marsal y Reséndiz**

Datos	S. Internacional	
<b>F (NAM)</b>	2	km
<b>Vv</b>	63.5	km/h
<b>NAN</b>	35	m
<b>NAM</b>	38.9	m
<b>D (NAM)</b>	15	m
<b>D (NAM)</b>	18.9	m
<b>m</b>	3	





a) Remanso:

$$R = \frac{V_v^2 F}{62000D} = \frac{63.5^2 * 2}{62000 * 18.9} = 0.007 \text{ m}$$

b) Altura de la ola:

$$h_w = 0.76 + 0.032\sqrt{V_v F} - 0.24\sqrt[4]{F} = 0.76 + 0.032\sqrt{63.5 * 2} - 0.24\sqrt[4]{2} = 0.84 \text{ m}$$

c) Trepada de la ola:

Para piedra a volteo se considera  $\frac{4 * h_w}{3}$  según el criterio

$$h_t = \frac{4 * h_w}{3} = \frac{4 * 0.84}{3} = 1.12 \text{ m}$$

d) Asentamiento debido a la acción sísmica

La selección de datos de la información de la tabla 3.2.3 se eligió al que mayor asentamiento dé con la ayuda de una hoja de cálculo.

El material de la cortina de la presa es Limo arenoso, el ángulo de fricción del material considerando en condición de operación debido al estado saturado (condición crítica) es de 28°

Datos		
Distancia	92	km
Profundidad	33	km
Magnitud del Temblor ( $M_t$ )	6,2	Richter
Aceleración de la gravedad ( $g$ )	981	cm/s <sup>2</sup>
Angulo de fricción interna del suelo ( $\phi$ )	28	grados
Cotangente del talud aguas arriba (m1)	3	
Cotangente del talud aguas arriba (m2)	2.5	

Con los datos los resultados son:

El ángulo que forma la inclinación del talud con la horizontal aguas arriba y aguas abajo es:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{1}{3} = 18.4^\circ \quad \beta_2 = \tan^{-1} \frac{1}{2.5} = 21.8^\circ$$

La distancia focal ( $R_t$ ) del foco hasta la zona del proyecto es:

$$R_t = \sqrt{92^2 + 33^2} = 98 \text{ km}$$

La aceleración de fluencia del talud ( $A_f$ ):

$$A_{f1} = g * (\text{Cos}\beta * \tan\phi - \text{sen}\beta) = 981 * (\text{Cos}18.4^\circ * \tan28^\circ - \text{sen}18.4^\circ) = 185.3 \text{ cm/s}^2$$

$$A_{f2} = g * (\text{Cos}\beta * \tan\phi - \text{sen}\beta) = 981 * (\text{Cos}21.8^\circ * \tan28^\circ - \text{sen}21.8^\circ) = 120 \text{ cm/s}^2$$

Como la distancia focal es menor a 100 km por lo tanto ocupo las ecuaciones 2.5.24 y 2.5.25 para Aceleración sísmica horizontal máxima y Velocidad máxima del suelo durante el sismo respectivamente.

$$K = 1230e^{0.8M_t}(R_t + 25)^{-2} = 1230e^{0.8*6.2}(98 + 25)^{-2} = 11.64 \text{ cm/s}^2$$

$$v = 15e^{M_t}(R_t + 0.17e^{0.59M_t})^{-1.7} = 15e^{6.2}(98 + 0.17e^{0.59*6.2})^{-1.7} = 2.74 \text{ m/s}$$

Por último se determina los asentamientos para cada aceleración de fluencia del talud y se suman como lo explica el criterio.

$\Delta H_E$  Asentamiento debido a acción sísmica [cm]

$$\Delta H_{E1} = \frac{2v^2}{A_f} \left(1 - \frac{A_f}{K}\right)^2 = \frac{2 * 2.74^2}{185.3} \left(1 - \frac{185.3}{11.64}\right)^2 = 18 \text{ cm}$$

$$\Delta H_{E2} = \frac{2v^2}{A_f} \left(1 - \frac{A_f}{K}\right)^2 = \frac{2 * 2.74^2}{120} \left(1 - \frac{120}{11.64}\right)^2 = 11 \text{ cm}$$

$$\Delta H_E = 18 + 11 = 29 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$$

e) BLM, BLN y Cota de corona:

$$BLM = R + \frac{2}{3}h_w + h_t + \Delta H_E = 0.007 + 1.12 + 0.3 = 1.4$$

$$\text{Cota de Corona (CC)} = NAM + BLM = 38.9 + 1.4 = 40.3 \text{ msnm}$$

$$BLN = CC - NAN = 40.3 - 35 = 5.3 \text{ m}$$



❖ **Novak, Moffat, Nalluri y Narayanan**

Datos	S. Internacional	
<b>F (NAM)</b>	2	km
<b>V<sub>v</sub></b>	63.5	km/h
<b>NAN</b>	35	m
<b>NAM</b>	38.9	m
<b>D (NAM)</b>	15	m
<b>D (NAM)</b>	18.9	m
<b>m</b>	3	

a) Altura de trepada de la ola ( $h_t$ )

Para una velocidad de viento igual a  $V_v = 63.5 \text{ km/h}$  (17.6 m/s) y un Fetch igual a  $F = 2 \text{ km}$  se puede estimar la altura significativa de la ola mediante la figura 2.5.7 igual a:

$$h_s = 0.55 \text{ m}$$

$$h_w = 1.3h_s = 1.3 * 0.55 = 0.7 \text{ m}$$

$$h_t = 1.5h_w = 1.5 * 0.7 = 1.1 \text{ m}$$

b) Remanso ( $R$ )

$$R = \frac{V_v^2 F}{62000D} = \frac{63.5^2 * 2}{62000 * 18.9} = 0.007 \text{ m}$$

c) Seiches ( $S$ )

Se asume el máximo valor recomendado:

$$S = 0.5 \text{ m}$$

Finalmente, el valor del bordo libre mínimo es:

$$BLM = 1.1 + 0.007 + 0.5 = 1.7 \text{ m}$$

$$Cota Corona (CC) = NAM + BLM = 38.9 + 1.7 = 40.6 \text{ msnm}$$

$$BLN = CC - NAN = 40.6 - 35 = 5.6 \text{ m}$$



❖ Knappen

Datos	S. Internacional	
F (NAM)	2	km
Vv	63.5	km/h
NAN	35	m
NAM	38.9	m
D (NAM)	15	m
D (NAM)	18.9	m
m	3	

a) Altura de la ola:

$$h_w = 0.76 + 0.34\sqrt{F} - 0.26\sqrt[4]{F} = 0.76 + 0.34\sqrt{2} - 0.26\sqrt[4]{2} = 0.9 \text{ m}$$

b) Velocidad de aproximación de la ola:

$$c = 1.52 + 2h_w = 1.52 + 2 * 0.9 = 3.3 \text{ m/s}$$

c) BLM, MLN, Cota de Corona:

$$BLM = 0.75h_w + \frac{c^2}{2g} = 0.75 * 0.9 + \frac{3.3^2}{2 * 9.81} = 1.2 \text{ m}$$

$$Cota \text{ de Corona } (CC) = NAM + BLM = 38.9 + 1.2 = 40.1 \text{ msnm}$$

$$BLN = CC - NAN = 40.1 - 35 = 5.1 \text{ m}$$

A continuación se presenta una tabla resumen del desarrollo de los criterios.

RECUBRIMIENTO	Piedra volteo	
Hd	3,9 m	
CRITERIOS	BLM (m)	BLN (m)
Experiencia Cubana	1,1	4,1
USBR	0,9	4,8
Creager y Justin	1,7	5,6
Linsley Franzini	1,1	5
Marsal y Reséndiz	1,4	5,3
Novak, Moffat, ...	1,7	5,6
knappen	1,2	5,1

**Tabla 3.4.1:** Resultados de los ejemplos de cada criterio.

## Capítulo 4: Análisis de Resultados

### 4.1. Comparación entre los distintos criterios de estimación de bordo libre

En la tabla 4.1.1 se muestran resultados de BLN sin tomar en cuenta la laminación y BLM variando la laminación (Hd). El criterio cubano, al manejarse por categorías de obra (Tabla 2.5.1) se muestra resultados para categoría 1, 2 y 3 necesarias para la comparación de criterios.

BORDO		BLN		BLM					
Hd		0		3,9		4		5,5	
Material de Protección		Piedra volteo	Horm.	Piedra volteo	Horm.	Piedra volteo	Horm.	Piedra volteo	Horm.
Experiencia Cubana	Cat. 1	1,8	2,3	1,4	1,7	1,4	1,7	1,4	1,7
	Cat. 2	1,6	2,1	1,2	1,5	1,2	1,5	1,2	1,5
	Cat. 3	1,4	1,8	1,1	1,3	1,1	1,3	1,1	1,3
Linsley Franzini		1,1	1,6	1,13	1,55	1,13	1,55	1,13	1,55
Marsal y Reséndiz		1,4	2	1,41	1,97	1,41	1,97	1,41	1,97
Gómez y Arancil		2,4	2,4	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33
USBR		0,94	1,25	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Creager y Justin		1,67	1,72	1,66	1,72	1,66	1,72	1,66	1,72
Novak, Moffat,...		1,62	1,99	1,60	1,96	1,60	1,96	1,60	1,96
knappen		1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Media Geométrica		1,43	1,71	1,42	1,61				
Media aritmética		1,49	1,75	1,47	1,67				
Mediana		1,40	1,72	1,41	1,72				

**Tabla 4.1.1:** Resultados de Bordo libre Normal y Mínimo

Análisis de la tabla:

- En cada criterio se observa que la variación de laminación no influye de manera significativa en los valores de bordo libre mínimo (BLM), ya que su variación es mínima, y esto se debe a:
  - El remanso función de laminación da valores bajos comparado con el valor del Bordo Libre.
  - La altura de la ola influye directamente en la trepada de la ola y por consiguiente en el BLN y BLM. Todos los criterios la determinan con el Fetch y velocidad del viento máximo, pero solo la experiencia Cubana ocupa laminación para corregirla.
- Los resultados para el caso del criterio de Gómez y Arancil son demasiado altos, los cuales no son tan dispersos, y eso se debe a la

altura adicional que recomienda y con ello intenta compensar las limitadas variantes que utiliza.

- Debido a la ligera variación de resultados entre los métodos, se determinó la media aritmética, geométrica y mediana de los resultados a excepción de la experiencia cubana, justamente para identificar a que categoría de obra tenderían, y como se esperaba son correspondientes o muy cercanos a la categoría 1 (Experiencia Cubana), lo cual tiene sentido; son muy conservadores ya que no cuestionan o evalúan los daños en caso del fallo de la presa.

Otra forma de evaluar los criterios para bordo libre es observando el comportamiento de algún parámetro de mayor influencia definido por los criterios, siendo éste la trepada de la ola sobre el talud de la presa ( $h_t$ ). Esta altura se determinó de dos maneras:

- a) Manteniendo constante la velocidad del viento y variando el Fetch, el comportamiento obtenido se muestra en la figura 4.1.1.
- b) Manteniendo constante el Fetch y variando la velocidad del viento, se muestra en la figura 4.1.2.

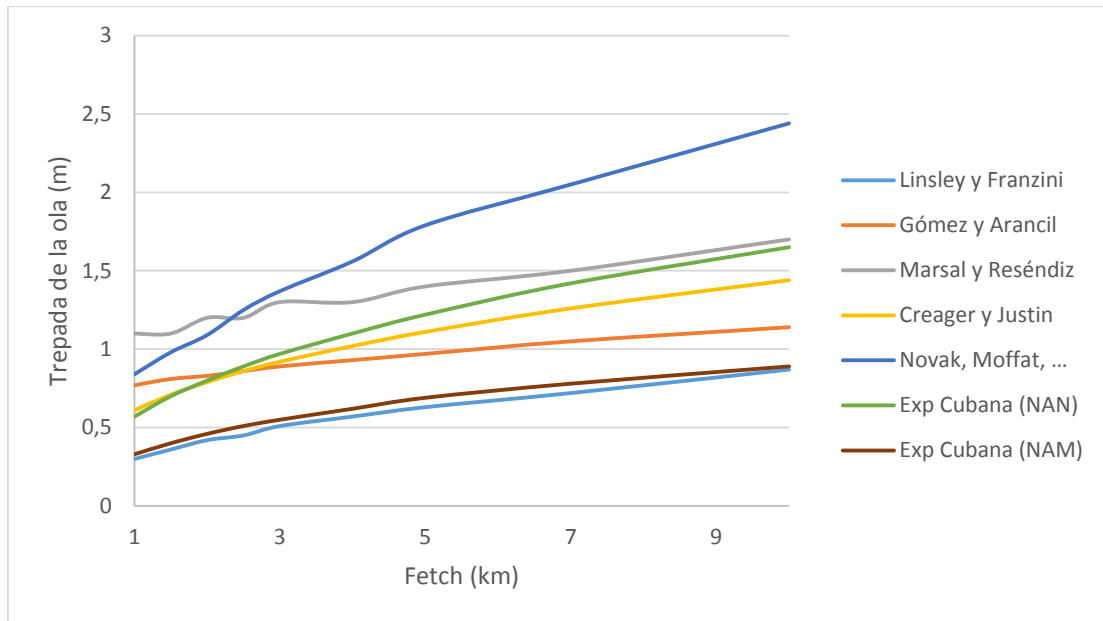
Como se puede observar en la figura 4.1.1 y figura 4.1.2, y la variación de la trepada de la ola entre criterios mantiene la misma tendencia.

La trepada de ola de los criterios de Experiencia Cubana (NAM) y de Linsley y Franzini son relativamente iguales, teniendo en cuenta que la Experiencia Cubana (NAM) trabaja con la probabilidad del 50% de máxima velocidad de viento, por tal razón el criterio de Linsley y Franzini no se considera.

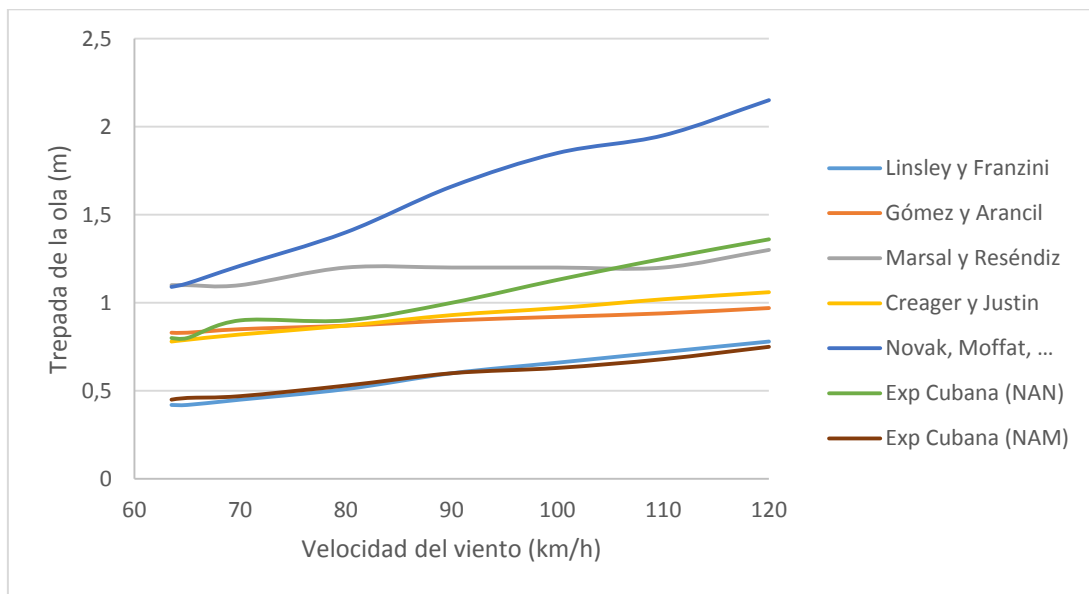
Gómez y Arancil indican una tendencia poco conservadora a medida que aumenta la velocidad del viento o el Fetch

En cambio los criterios Creager y Justin, Marsal y Reséndiz y la Experiencia Cubana (NAN) mantienen un crecimiento racional a medida que se incrementa la velocidad del viento o el fetch, aunque para valores de Fetch menores a 4 km Marsal y Reséndiz da valores demasiado altos respecto a los de Creager & Justin y la Experiencia Cubana.

Por lo tanto la curva que mejor comportamiento se observa en ambas figuras y en todo el intervalo analizado, sin ser exageradamente conservador, ya sea para valores bajos o altos es la Experiencia Cubana (NAN), siendo válida en la comparación con los demás criterios ya que esta se determina con el 2-4% de que ocurra la máxima velocidad de viento, cercana al que consideran los demás criterios.



**Figura 4.1.1:** Fetch vs Trepada de ola



**Figura 4.1.2:** Velocidad del viento vs Trepada de ola

Finalmente en base a este análisis y tomando en consideración aspectos económicos, variables consideradas, etc.; el criterio idóneo para el proyecto se considera el recomendado por la Experiencia Cubana, ya que a más del modo detallado de condiciones, efectiviza el análisis al considerar determinante la categoría de obra, ya que no es lo mismo construir una misma presa en donde aguas abajo haya una ciudad o solo cultivos.

#### 4.2. Validación del criterio de estimación de Bordo Libre a presas de características similares construidas en Ecuador

A continuación se muestra una aplicación del criterio seleccionado como el idóneo para el proyecto PACALORI, a dos presas localizadas en la provincia de Manabí: Poza Honda y La Esperanza; construidas para el control de inundaciones, abastecimiento de agua para riego y agua potable.

##### Presa Poza Honda

Construida en 1971. Es una presa de tierra homogénea, su altura es de 40 m sobre el lecho del río, longitud de coronación 530 m, talud aguas arriba con revestimiento de hormigón asfáltico. El nivel del lecho del río 75 msnm, NAN 108.5 msnm, NAM 112.3 msnm, Cota de Corona 114.3 msnm, Fetch 2.6 km, BLN 5.8 m y BLM 2 m [31]. La velocidad de viento se asumió igual a 120 km/h como se menciona en el Estudio de Factibilidad: Climatología, Hidrología, Sedimentología y Balance Hídrico [17]. No se contaba con información de la inclinación del talud aguas arriba, por lo que se asumió un talud de 3.5:1 por su similitud con la presa La Esperanza.

Se han aplicado las ecuaciones 2.5.1 a 2.5.8 del criterio de estimación de Bordo Libre según la experiencia Cubana, asumiendo una altura de seguridad (ver tabla 2.4.2) según la categoría de la presa. Los resultados se muestran en la tabla 4.2.1:

Categoría	I	II	III	IV
BLN	6	5.8	5.6	5.5
BLM	2.2	2	1.8	1.7

**Tabla 4.2.1:** Valores de Bordo Libre: Presa Poza Honda

Los resultados de la tabla 4.2.1 muestran que al considerar la presa como categoría II los resultados de bordo libre Normal y Mínimo son idénticos.

##### Presa La Esperanza

Construida en 1977. Es una presa de tierra zonificada con núcleo central de arcilla y espaldones de arenisca, su altura es de 48 m sobre el lecho del río, longitud de coronación 700 m, talud aguas arriba 3.5:1 con revestimiento de piedra colocada a mano. El nivel del lecho del río 22 msnm, NAN 66 msnm, NAM 67.7 msnm, Cota de Corona 70 msnm, Fetch 9.2 km, BLN 4 m y BLM de 2.3 m [31]. No se contaba con información de la velocidad de viento, por lo que se asumió igual a 120 km/h por su similitud con la presa Poza Honda.

Se han aplicado las ecuaciones 2.5.1 a 2.5.8 del criterio de estimación de Bordo Libre según la experiencia Cubana, asumiendo una altura de seguridad





(ver tabla 2.4.2) según la categoría de la presa. Los resultados se muestran en la tabla 4.4.2:

Categoría	I	II	III	IV
BLN	4.5	4.2	4	3.8
BLM	2.8	2.5	2.3	2.1

**Tabla 4.2.2:** Valores de Bordo Libre: Presa La Esperanza

Los resultados de la tabla 4.2.2 muestran que al considerar la presa como categoría III los resultados de bordo libre Normal y Mínimo son idénticos.

## Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

- ❖ Se identificó el viento como el factor que más influye en la generación de olas de mayor altura en nuestros embalses, por las siguientes razones:
  - En base a revisiones bibliográficas [5, 7, 9] y comentarios de expertos en presas, no consideramos oleajes debido a sismo, ya que la duración del sismo no es suficientemente larga para generar las oscilaciones sísmicas que puedan entrar en resonancia con las oscilaciones naturales del embalse y se conviertan éstas en riesgo. Además la costa Ecuatoriana ha soportado pocos sismos destructores y éstos han sido lejanos a la zona del Proyecto PACALORI. El hecho de que no consideramos oleajes debido al sismo en este proyecto que es región costa no significa generalizar en todo el Ecuador y menos fuera del país, ya que el riesgo sísmico es diferente en cada región del planeta.
  - El cálculo de la trepada de la ola generada por deslizamiento de la ladera sobre el embalse resultó, para el caso más desfavorable, un valor igual a 0.2 m, lo cual es mucho menor que la altura de seguridad recomendada según el criterio la Experiencia Cubana (valores superiores a 0.5 m).
- ❖ La cantidad de criterios utilizados en la estimación de Bordo Libre dieron resultados diferentes, lo cual es una muestra de la incertidumbre que caracteriza el cálculo del bordo libre (ver tabla 3.4.1 y 4.1.1)
- ❖ Algunos criterios requieren la utilización de ábacos que conducen a valores de bordo libre por exceso o por defecto, debido a que dependen de la subjetividad implicada en la estimación de quien los utilice.
- ❖ Con la comparación de BLN y BLM (Tabla 4.1.1), entre criterios sin considerar la Experiencia Cubana, se concluye que los mismos fueron definidos para la categoría más conservadora (categoría 1 según la Experiencia Cubana y categoría “A” en Ecuador), justamente por la falta de valoración de la obra, magnitud del daño que ocasionaría en caso de fracasar, etc.
- ❖ En base al estudio realizado, se recomienda la aplicación del Criterio de la Experiencia Cubana (inciso 2.5.1) para la estimación del bordo libre normal (BLN) y bordo libre mínimo (BLM), el mismo que nos permitirá efectivizar dimensiones, economía y, lo más importante, la seguridad de la población beneficiada y no beneficiada en general.



- ❖ Al aplicar el criterio adoptado como el idóneo para el proyecto PACALORI a las presas de similares características: Poza Honda y La Esperanza, se observó que los valores de Bordo Libre obtenidos son bastante cercanos a los valores de Bordo Libre de los diseños de dichas presas; con lo cual consideramos que el criterio empleado es confiable para el proyecto PACALORI.
- ❖ En cada criterio se observó que la variación de laminación no influye de manera significativa en los valores de bordo libre mínimo (BLM), ya que su variación es mínima (tabla 4.1.1)
- ❖ Se identificó la importancia que implica la laminación en la estimación del bordo libre normal, debido al incremento considerable (tabla 3.4.1), respecto al BLN sin laminación (tabla 4.1.1); por lo tanto, la disminución del bordo libre normal dependerá de la efectividad de la estimación de la máxima avenida (estudio Hidrológico) y optimización del vertedero de exceso (estudio hidráulico).
- ❖ Se recomienda utilizar en el criterio de la Experiencia Cubana la categoría de presa tipo I, correspondiente a la categoría A en Ecuador, por la existencia de poblados aguas abajo de los embalses y por los posibles daños materiales o medio ambientales.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Middlebrooks, T. A., 1953. Earth Dam Practice in the United States, Trans. ASCE, Century Volumen.
- [2] Gómez Navarro, J. y Arancil Segura, J., 1953. Saltos de agua y Presas de Embalse. Tipografía Artística Alameda, Madrid, Tercera Edición, Tomo Segundo.
- [3] Heller, V.; Hager W. and Minor H., 2009. Landslide Generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, Zurich.
- [4] Comité Nacional Español De Grandes Presas (CNEGP), 2003. Guías Técnicas de Seguridad de Presas N°2, Criterios para proyectos de presas y sus obras anexas.
- [5] Sherard, J. L.; Woodward, R. J.; Gizienski, S. F. and Clevenger W. A., 1963. Earth and Earth Rock Dams. New York, NY.
- [6] Armas, R. y Horta, E., 1987. Presas de Tierra, Editorial CUJAE. (Reimpresión 2010). La Habana, Cuba.
- [7] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1981. Freeboard Criteria and Guidelines for Computing Freeboard Allowances for Storage Dams. Acer Technical Memorandum N° 2. Denver, Colorado
- [8] Linsley, R. y Franzini, J., 1964. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos, Compañía Editorial Continental, S. A., Séptima Impresión al español 1976, México, Segunda edición.
- [9] Creager, W. P. and Justin, J. D., 1950. Hydroelectric Handbook. Second edition. New York.
- [10] Marsal, R. y Reséndiz Núñez, D., 1975. Presas de Tierra y Enrocamiento (Reimpresión 1979), UNAM. México, D. F.
- [11] Novak, P.; Moffat, A.; Nalluri, C. and Narayanan, R., 2001. Estructuras Hidráulicas. McGraw-Hill, Traducido de la segunda edición en inglés. Bogotá, Colombia.
- [12] Rosales, J. D., 2009. Desarrollo de un protocolo para la evaluación de la seguridad de presas en Venezuela: aplicación al embalse tres ríos “El Diluvio”.
- [13] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1987. Design of Small Dams. Third Edition.
- [14] Körner, H. J., 1976. Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fliessschneelawinen. Rock Mechanics.



- [15] Heller, V. and Hager, W. H., 2009. Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (provisionally accepted).
- [16] Müller, D., 1995. Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren. VAW-Mitteilung 137, Vischer, D., ed. ETH Zurich, Zurich.
- [17] PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013. Tomo 3: Estudio de Factibilidad: Climatología, Hidrología, Sedimentología y Balance Hídrico.
- [18] ICE, 1978. Floods and Reservoir Safety. Institution of Civil Engineers, London.
- [19] Saville, T. Jr., McClendon, E. W. and Cochran, A. L., 1962. Freeboard Allowances for Waves in Inland Reservoirs. Journal Waterways and Harbors Division, ASCE.
- [20] Molitor, D. A., 1935. Wave Pressures on Sea Walls and Breakwater. Trans. ASCE.
- [21] Newmark, N. M. y Rosenblueth, E., 1971. Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
- [22] Esteva, L. y Rosenblueth, E., 1964. Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes. Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Vol 2, N°1, México, D. F.
- [23] Thomas, H. H., 1976. The Engineering of Large Dams, Vol. 1, John Wiley and Sons, New York.
- [24] Davis, C. D. and Sorensen, K. E., 1969. Handbook of Applied Hydraulics. McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> edition, New York.
- [25] International Committee on Large Dams (ICOLD), 2003. Crecidas y Presas: Pautas e Historia de Casos, Boletín N° 125.
- [26] Saville, T. Jr., 1954. Shore Protection Manual, U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [27] PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013. Tomo 9: Estudio de Alternativas y Diseño Preliminar de Obras Hidráulicas de cada Alternativa.
- [28] PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013. Estudio de Prefactibilidad - Resumen ejecutivo.
- [29] PROMAS-Universidad de Cuenca, 2013. Tomo 5: Estudio de Prefactibilidad: Geología, Geotecnia y Fuentes de materiales.



- 
- [30] Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), 2012. Servicios de Consultoría para la Elaboración del Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de Los Ríos. Quito-Ecuador.
- [31] Managéneración S.A., 2002. Concurso para la selección de un socio estratégico para la construcción, operación y explotación de las centrales hidroeléctricas La Esperanza y Poza Honda y la operación y mantenimiento de los trasvases II y III del sistema Manabí y las presas La Esperanza y Poza Honda.