

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA REDUCCIÓN DEL GASTO DE FILTRACIÓN Y EL GRADIENTE HIDRÁULICO ENTRE LAS PANTALLAS CONTRA FILTRACIÓN Y LA GEOMEMBRANA EN PRESAS DE TIERRA HOMOGÉNEA

Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTORES:

Angel Hernán Chacón Villa

Juan Alejandro Andino Encalada

DIRECTOR:

Ing. Rolando Armas Novoa

Cuenca – Ecuador
Junio, 2014



RESUMEN

El Programa para Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), que elabora el proyecto PACALORI, tiene como objetivo fundamental el control de inundaciones y el abastecimiento de agua para riego en la provincia de Los Ríos, por lo que se construirán grandes obras de infraestructura hidráulica que permitirá almacenar agua durante el invierno y usarla durante el verano.

El principal propósito de este trabajo de tesis es analizar la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico en presas de tierra homogéneas del proyecto PACALORI para diferentes medidas contra filtración planteadas mediante simulación con el software SEEP/W del GeoStudio, esto es, con el fin de compararlas con el gasto ecológico establecido durante la etapa de Factibilidad y decidir si se requiere o no medidas contra filtración.

En los diferentes casos analizados se determinó que el aporte del gasto por filtración al gasto ecológico, para cada una de las presas de tierra, es despreciable. Por tal razón, en este análisis se ha concluido que no se requieren medidas contra filtración, No obstante, por la experiencia internacional en presas de tierra, se recomienda la construcción de un dentellón de arcilla.

Palabras Claves: Presas de tierra, análisis, filtración, gasto ecológico, SEEP/W



ABSTRACT

The program for Water management and soil (PROMAS), that makes the PACALORI project has main purpose in the flood control and water supply for irrigation in the province of Los Ríos ,so large hydraulic infrastructure will be built to store water during the winter and use it during the summer.

The main purpose of this thesis is to analyze the reduction of the seepage flow and hydraulic gradient in homogeneous earth dam of the PACALORI project for various cases of action against seepage through simulation with Geostudio(SEEP/W) software , namely in order to compare with the ecological flows established during the feasibility stage and decide whether or not action is required against filtration.

In the different cases analyzed was determined that the contribution of seepage flow to ecological flow, It's negligible. For this reason, in this analysis it was concluded that no action are required against seepage, however , by international experience in earth dams, is recommended build a clay cutoff.

Keywords: Earth Dams, analysis, seepage, ecological flow, SEEP / W



CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	5
INTRODUCCIÓN	12
ANTECEDENTES	12
JUSTIFICACIÓN	12
ALCANCE	13
OBJETIVOS	13
General.....	13
Específicos	13
CAPÍTULO 1	14
1. FILTRACIÓN LIBRE	14
1.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.....	14
1.1.1. Introducción	14
1.1.2. Límites de validez de la ley de Darcy.....	15
1.1.3. Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos.....	16
1.1.4. Teoría de la sección transformada.....	19
1.2. TEORIA DE LAS REDES DE FLUJO.....	22
1.2.1. La red de flujo.....	22
1.2.2. Trazo de la red de flujo. Calculo de gasto.....	22
1.2.3. Fuerzas de filtración. Gradiente critico de ebullición	26
1.3. FLUJO DE AGUA A TRAVES DE PRESAS DE TIERRA.....	27
1.4. OTROS MÉTODOS APROXIMADOS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE FLUJO	30
1.5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	32
CAPÍTULO 2.....	35
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	35
2.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	35
2.2.1. Ubicación.....	36
2.2.2. Geología.....	37
2.2.3. Geología Regional	37
2.2.3.1. Características geológicas en el lugar de emplazamiento de las presas.....	38
2.3. DATOS DE LAS PRESAS	42



2.3.1.	Recolección y preparación de datos	42
2.3.1.1.	Topografía del lugar de emplazamiento de las presas.....	42
2.3.1.2.	Nivel de operación o nivel de cresta de los vertederos de exceso. (Nivel de Aguas Normales, NAN)	43
2.3.1.3.	Geometría de las presas de tierra homogéneas.	44
2.3.1.4.	Características generales y propiedades mecánicas de los materiales...	45
2.4.	MODELACIÓN EN SEEP/W	47
2.4.1.	Principales pasos a seguir para la modelación de la filtración con SEEP/W: .	49
2.4.2.	Método de análisis	51
CAPÍTULO 3.....		52
3.	APLICACIÓN, CÁLCULO Y RESULTADOS	52
3.1.	MODELACIÓN EN SEEP/W DE LA PRESA DE MACULILLO	52
3.2.	RESULTADOS DEL GASTO DE FILTRACIÓN DE LAS PRESAS DEL PROYECTO PACALORI.....	56
3.3.	RESULTADOS DEL GRADIENTE HIDRÁULICO AL PIE DEL TALUD AGUAS ABAJO.....	57
3.4.	COMPARACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO CON EL GASTO DE FILTRACIÓN.	58
CAPÍTULO 4.....		60
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS		62
ANEXOS.....		63
Anexo 1. Mapa del área del proyecto PACALORI		64
Anexo 2. Valores de carga hidráulica y longitud de aportación para las secciones centra, margen izquierdo y derecho.....		65
Anexo 3. Resultados de la modelación y el cálculo del gasto por filtración para las secciones central, margen izquierdo y margen derecho.....		66



LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Conservación de la masa en un volumen de control. (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987)</i>	16
<i>Figura 1.2 Región de flujo de material anisótropo.</i>	19
<i>Figura 1.3 Teoría de la Sección Transformad</i>	20
<i>Figura 1.4 Sección transformada resultante (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).</i>	21
<i>Figura 1.5 Caudal y gradiente en un canal (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).</i>	23
<i>Figura 1.6 Ejemplo de red de flujo a través de una presa de tierra homogénea (Flores Berrones, 2000)</i>	28
<i>Figura 1.7. Parábola de Dupuit y Cálculo del caudal según la fórmula de Dupuit, (Marsal & Resendiz Nuñez, 1937)</i>	29
<i>Figura 2.1 Ubicación del área del proyecto (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA 2013)</i>	36
<i>Figura 2.2 Cierre de la Presa Maculillo (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2013)</i>	43
<i>Figura 2.3 Dimensiones del dentellón</i>	45
<i>Figura 2.4 Geometría de la Presa con dentellón de arcilla</i>	48
<i>Figura 2.5 Geometría de la presa con pantalla colgante de hormigón plástico</i>	48
<i>Figura 2.6 Geometría de la presa con geomembrana</i>	49
<i>Figura 3.1 Representación grafica del los resultados para el gradiente hidráulico</i>	58
<i>Figura 3.2 Representación grafica del porcentaje de aportación al caudal ecológico</i>	59

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Gradientes admisibles para distintos tipos de suelo (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987)</i>	27
<i>Tabla 2.1 Presas a analizar (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA 2013)</i>	36
<i>Tabla 2.2 Cargas hidráulicas máximas en las presas (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA 2013)</i>	43
<i>Tabla 2.3 Características de geometría de las presas (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA 2013)</i>	44
<i>Tabla 2.4 Permeabilidades para los materiales de las presa</i>	47
<i>Tabla 3.1 Gasto de filtración de las presas del proyecto PACALORI</i>	56
<i>Tabla 3.2 Gradiente Hidráulico de las presas del trasvase 1</i>	57
<i>Tabla 3.3 Gradiente Hidráulico de las presas del transvase 2</i>	57
<i>Tabla 3.4. Comparación del caudal ecológico y el gasto de filtración.</i>	58



Yo, *Angel Hernán Chacon Villa*, autor de la tesis "Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea", 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 hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Junio del 2014

Angel Chacón

Angel Hernán Chacon Villa

C.I: 1400732259



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, *Juan Alejandro Andino Encalada*, autor de la tesis "Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea", 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 hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Junio del 2014

Juan Alejandro Andino Encalada

C.I: 0105760987



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, *Angel Hernán Chacon Villa*, autor de la tesis "Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Junio del 2014

Angel Chacón

Angel Hernán Chacon Villa

C.I: 1400732259



Yo, *Juan Alejandro Andino Encalada*, autor de la tesis "Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Junio del 2014

Juan Alejandro Andino Encalada

C.I: 0105760987



DEDICATORIA

A mis padres, Laura María de Jesús Villa Cabrera
y Luis Belisario Chacón Guzmán, también a mis
hermanos, que siempre están apoyándome a
cumplir las metas que me propongo.

Angel Hernán

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos que
me han brindado todo su apoyo, por ayudarme a
cumplir mis metas y logros.

Juan Alejandro



AGRADECIMIENTOS

Al *Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS)* – Universidad de Cuenca, por habernos dado la oportunidad de trabajar en este proyecto, de manera especial a nuestro Director y Tutor de tesis *Ing. Rolando Armas Novoa*, quien con sus valiosos conocimientos en el tema y su generosa ayuda, ha hecho posible la culminación con éxito del presente trabajo.

A nuestros padres, hermanos y amigos, por todo el apoyo incondicional brindado durante el transcurso de estos años.

Angel Hernán y Juan Alejandro



INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

La estación invernal en la parte costera del Ecuador causa grandes problemas de inundación, afectando a las poblaciones en aspectos de salud, agricultura, vivienda, etc. Por ello es importante tener control del agua para garantizar, ante todo, la seguridad y para poder aprovechar su uso en tiempos de sequía.

La provincia de los Ríos presenta un desequilibrio en la distribución de sus recursos hídricos, ya que presenta dos marcadas estaciones; en los meses de enero-mayo ocurren inundaciones y en el verano julio-diciembre ocurren sequías. Es por esto que se implementará el proyecto Plan de Aprovechamiento y Control de Agua de la Provincia de los Ríos (PACALORI). Este proyecto consiste de grandes obras de infraestructura hidráulica, que permitirá almacenar agua durante la época lluviosa y usarla durante la época seca.

Dentro del proyecto PACALORI se construirán 13 presas de tierra, en las cuales se necesitará un análisis de la filtración, ya que es un tema de suma importancia para conocer las pérdidas por filtración y la reducción del gradiente hidráulico.

JUSTIFICACIÓN

Debido a los marcados periodos de sequias e inundaciones en la provincia de los Ríos, se ha visto la necesidad de regular el potencial hídrico del sector mediante obras de infraestructuras hidráulicas, para almacenar agua en épocas lluviosas y usarlas en épocas de sequía.

Para ello se plantea la construcción de 13 presas de tierra homogéneas; en este tipo de presas siempre se debe modelar y analizar las filtraciones con y sin medidas contra filtraciones, para saber la reducción del gasto y el gradiente hidráulico.

Por tal motivo se plantea la modelación, mediante el programa SEEP/W sin medidas contra filtración y con medidas contra filtración, como la utilización de geomembrana y pantallas de hormigón plástico de bentonita-cemento.



ALCANCE

Con la investigación se pretende modelar la filtración del agua en las 13 presas de tierra con sus medidas de reducción de la filtración como la utilización de geomembranas y pantallas de hormigón plástico de bentonita-cemento, para el análisis en la reducción de gasto y el gradiente hidráulico.

Este estudio será realizado en la etapa de Factibilidad, con la información existente hasta esta etapa del proyecto.

OBJETIVOS

General

- Analizar los resultados de la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico, entre pantallas de hormigón plástico de bentonita-cemento y la geomembrana, en presas de tierra homogéneas para el proyecto PACALORI y compararlas con el gasto ecológico, a fin de decidir si se requiere o no medidas contra filtración.

Específicos

- Modelar el gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre pantallas de hormigón plástico de bentonita-cemento y la geomembrana en presas de tierra homogéneas para el proyecto PACALORI, utilizando el software SEEP/W.
- Dar posibles dimensiones en la construcción de pantallas de hormigón plástico de bentonita-cemento, para la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico
- Dar posibles dimensiones de geomembrana para la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico.
- Comparar los gastos de las diferentes variantes de medidas contra filtraciones a través del cimiento con el gasto ecológico.



CAPÍTULO 1

1. FILTRACIÓN LIBRE

1.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

1.1.1. Introducción

Las bases para un análisis de los problemas prácticos en donde involucra la filtración de agua a través de los suelos fueron establecidas por Darcy en trabajos que datan de hace más de un siglo. Posteriormente, alrededor de 1880 Forchheimer realizó un avance fundamental en el conocimiento, demostrando que la función de carga hidráulica que gobierna el flujo en un medio poroso es una función armónica, es decir, que satisface la ecuación de Laplace.

El método gráfico ideado por Forchheimer por el año de 1930, que hoy se conoce con el nombre de Método de las Redes de Flujo, es el más sencillo y poderoso con que el ingeniero cuenta para la resolución práctica de los problemas de flujo de agua en suelos, este método fue popularizado por Casagrande a partir de 1937 (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).

Al resolver un problema práctico de flujo de agua, tal como el análisis de las infiltraciones a través de la cortina y del terreno de cimentación de una presa de tierra, el ingeniero obtiene:

1. El gasto de agua por filtración a través de la zona de flujo.
2. La influencia del flujo de agua sobre la estabilidad general de la masa de suelo a través de la que corre.
3. Las posibilidades del agua de filtración de producir arrastres de material sólido, erosiones, sifonamientos, etc.

Armas Novoa y Horta Mestas (1987), clasifican el agua en el suelo en tres categorías:

1. Agua adsorbida: está ligada a las partículas del suelo por fuerzas de origen eléctrico. No participa en el flujo.
2. Agua capilar: esta se mueve debida al fenómeno de tensión superficial. El efecto del flujo en la zona de agua capilar es pequeño y suele despreciarse.



3. Agua libre o gravitacional: bajo el efecto de la gravedad puede moverse en el interior de la masa sin otro obstáculo que el que le imponen su viscosidad y la trama estructural del suelo.

La teoría de las redes de flujo se aplica solamente al agua libre o gravitacional que se encuentra por debajo del nivel freático.

1.1.2. Límites de validez de la ley de Darcy

La ley de Darcy indica una relación lineal, demostrando que la velocidad de descarga del flujo a través de un medio poroso es directamente proporcional al gradiente hidráulico, en donde únicamente es aplicable en la resolución de problemas cuyo flujo de agua sea laminar.

El número de Reynolds es la relación adimensional entre la fuerza de inercia y la fuerza viscosa para un flujo dado. Dicha relación establece que:

$$R = \frac{vD\rho}{u} \tag{1.1}$$

v : Velocidad de descarga (cm/s)

D : Diámetro promedio de las partículas de suelo (cm)

ρ : Densidad del fluido (g/cm^3)

u : Coeficiente de viscosidad del flujo ($g/cm \cdot s$).

El valor límite del número de Reynolds para que el flujo laminar cambie a turbulento esta alrededor de 1–12. Si en la ecuación (1.1) se cambian los valores de ρ , u para el agua, y se acepta una velocidad conservadora de $v = 0.25 cm/s$ ya que es una velocidad elevada para el flujo de agua en los suelos, se da a tener que $R \leq 1$ siempre que D no sobrepase al valor de $0.4mm$, que corresponde a una arena gruesa. De esta manera se garantiza la validez de la ley de Darcy y el flujo laminar en el agua hasta estos tipos de suelos como mínimo.



1.1.3. Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos.

Considérese el volumen de control a una región de suelo a través la cual fluye el agua, un elemento paralelepípedo de dimensiones dx , dy , dz como se muestra en la figura 1.3

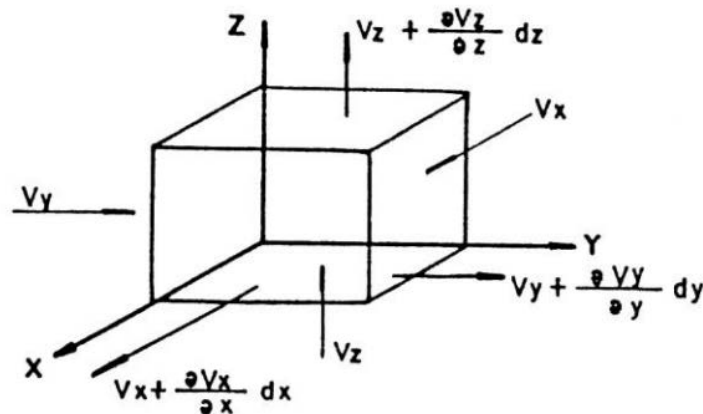


Figura 1.1 Conservación de la masa en un volumen de control. (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987)

Supóngase que la velocidad v con la que el agua pasa por el elemento tiene componentes v_x, v_y, v_z , estas solo son funciones de x, y, z respectivamente.

Se supone que estas componentes son funciones continuas que admiten cualquier orden de derivación. Las componentes de la velocidad en las caras de entrada y en las caras de salida serán los mostrados en la figura 1.3

Se supondrá que el suelo por el cual fluye el flujo tendrá sus vacíos saturados por el agua y que dicho elemento como las partículas sólidas que forman la estructura del suelo son incompresibles en sí mismas. Durante el flujo la cantidad de agua que entra será la misma que salga.

$$Q_{entrada} = Q_{salida}$$

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

Reduciendo la ecuación se obtiene:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{1.2}$$



La ecuación anterior es la ecuación de continuidad y las hipótesis sobre las que se fundamentan son:

1. El Régimen es establecido.
2. El suelo está saturado.
3. El agua y las partículas sólidas son incompresibles en sí mismas.
4. El flujo no modifica la estructura del suelo.

Si también se supone válida la ley de Darcy, la velocidad de descarga del agua a través del elemento, podrá escribirse como:

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial l} = k \cdot i$$

Donde:

$$\frac{\partial h}{\partial l} : \text{Gradiente hidráulico}$$

Y sus componentes son:

$$v_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} \tag{1.3}$$

En las ecuaciones (1.3) se ha supuesto el caso más general donde el suelo se considera anisótropo en lo referente a la permeabilidad, con permeabilidad diferente a lo largo de los tres ejes diferentes coordenados.

Introduciendo esta hipótesis en la ecuación de continuidad, se tiene:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{1.4}$$

En los problemas de Mecánica de Suelos, es muy frecuente que el flujo en una sección de la región considerada, transversal a su eje longitudinal, sea idéntico al que se tiene en cualquier otra sección. Un ejemplo de esto son las presas de tierra de eje largo en comparación con su altura. Así que los efectos en el borde de la



región de flujo pueden ignorarse, de esta manera se puede estudiar bidimensionalmente el problema de flujo, entonces:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1.5)$$

Si además la masa del suelo en estudio por la cual fluye el agua es isótropa en cuanto a la permeabilidad ($k_x = k_y = k$), entonces puede reducirse la ecuación (1.5)

y se tiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \nabla^2 h = 0 \quad (1.6)$$

A esta ecuación se la conoce en el campo de la física como ecuación de Laplace.

Las redes de flujo es uno de los métodos más ampliamente usados para solucionar distintos problemas de infiltración en presas y otros proyectos que involucran estructuras hidráulicas; este método gráfico es aún uno de los más aceptados para dar solución a los problemas de infiltración resolviendo la ecuación de Laplace (Casagrande, 1937). Si se conocen las condiciones de frontera y la geometría en la región de flujo que puede analizarse en forma bidimensional, la red de flujo proporciona una información visual de lo que está pasando (valores de caudal y de presión) en la región de análisis.

La ecuación de Laplace, es una ecuación en derivadas parciales elíptica, cuya solución puede representarse gráficamente por dos familias de curvas. Dos funciones conjugadas armónicas h y ψ satisfacen la ecuación de Laplace y las curvas $h(x, z) = cte$ y $\psi(x, z) = cte$ son ortogonales (Harr, 1962). Una de estas familias de curvas representa las trayectorias físicas y reales a través de una región de flujo, o líneas de corriente, $\psi(x, z)$. La otra familia está constituida por las curvas representativas de los puntos de igual carga hidráulica y se las denomina líneas equipotenciales, $h(x, z)$. Las redes de flujo son una solución única para una condición específica de infiltración, es decir, que existe las dos familias de curvas mencionadas anteriormente y que será solución para una geometría y condiciones de contorno dadas.



Propiedades importantes de estas líneas:

- El gasto que pasa entre dos líneas de flujo es constante en cualquier sección que se tome entre las líneas.
- Las líneas de flujo no se cortan entre sí, al igual las líneas equipotenciales

1.1.4. Teoría de la sección transformada

Para resolver problemas de flujo en donde se presenta anisotropía con respecto a la permeabilidad los autores Badillo J. y Rodríguez R. señalan que es frecuente la anisotropía en los suelos y en cuanto a la permeabilidad se da que $k_x \neq k_y$. La Teoría de la Sección Transformada mediante un artificio matemático permite estudiar todos los problemas de flujo como si este ocurriera a través de suelos isotropos, es decir, el artificio permite reducir al caso de un suelo homogéneo e isotropo a partir de un suelo en que la permeabilidad para el flujo en la dirección horizontal (k_x) y la que tenga para el flujo en dirección vertical (k_y) sean diferentes.

El artificio de cálculo se logra por una sencilla transformación de coordenadas, que modifica las dimensiones de la zona de flujo en estudio, de manera que la nueva sección obtenida es isotropa con $k_x = k_y$, y en la que se puede determinar todas las condiciones de flujo que interesan, iguales a las prevalecientes en la sección propuesta, en la que $k_x \neq k_y$.

En la Figura 1.32 representa una región de flujo en la que $k_x > k_y$

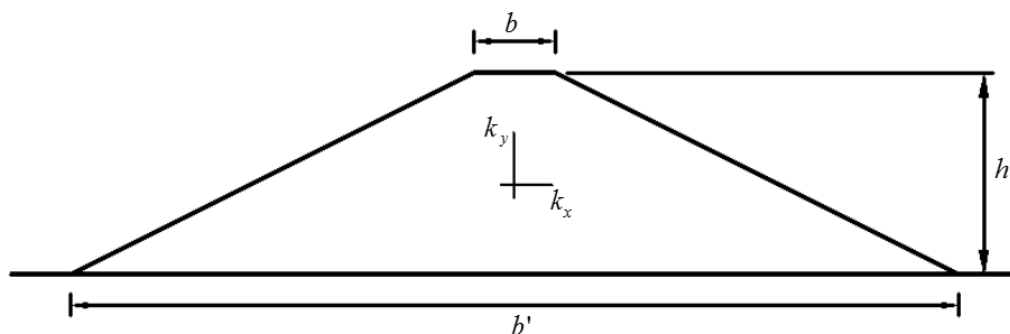


Figura 1.2 Región de flujo de material anisótropo.



Realizando la siguiente transformación de coordenadas en el eje x, tal que:

$$x' = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} y' \tag{1.7}$$

La ecuación (1.5) puede escribirse como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \tag{1.8}$$

Figura 1.3 Teoría de la Sección Trasformad

De la transformación 1.7, esta puede escribirse:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x'} \cdot \frac{\partial x'}{\partial x} = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \cdot \frac{\partial h}{\partial x'} \tag{1.9}$$

Ya que:

$$\frac{\partial x'}{\partial x} = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \tag{1.10}$$

Y también:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} \tag{1.11}$$

Sustituyendo la ecuación (1.11) en la ecuación (1.8) se tiene:

$$\frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \tag{1.12}$$

Lo que reduce a:

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

Esta ecuación es de Laplace para las coordenadas x' y y .



La figura 1.4 muestra la sección transformada resultante en la que quien dirige y gobierna el flujo es la ecuación de Laplace.

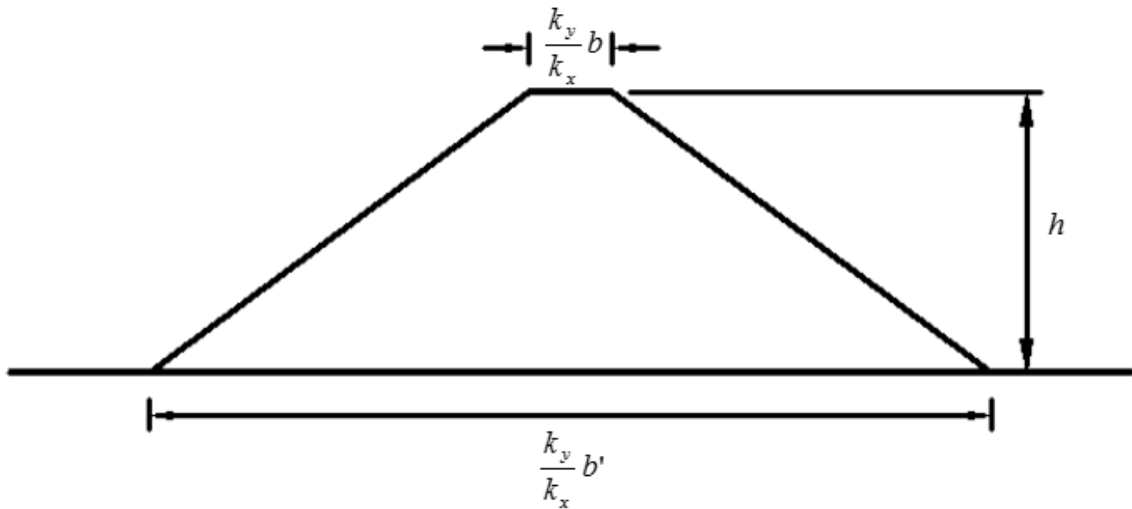


Figura 1.4 Sección transformada resultante (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).

La permeabilidad equivalente en la sección transformada es igual a:

$$k = \sqrt{k_x k_y}$$

De esta manera tenemos que realizar el cálculo del gasto de filtración en la sección transformada considerando como valor de la permeabilidad igual a la media geométrica de las permeabilidades reales

Para calcular el gradiente hidráulico y la presión hidrodinámica es necesario llevar la red de flujo de la sección transformada a la sección real del problema y en ésta obtener los valores antes mencionados.



1.2. TEORIA DE LAS REDES DE FLUJO

1.2.1. La red de flujo.

Las líneas de flujo y las líneas equipotenciales son dos familias de curvas ortogonales entre sí, que dan la solución a la ecuación de Laplace. Además, dos familias de líneas que cumplan la condición de ortogonalidad y las condiciones de frontera de la región de flujo constituirán una solución única de la ecuación de Laplace y, por ende, del problema de flujo descrito por aquella ecuación.

El método de las redes de flujo es puramente gráfico, tratando de definir en cada caso particular las condiciones de frontera del problema, y dibujar cumpliendo aquellas las dos familias de curvas ortogonales, obteniendo una imagen gráfica del problema.

Al dibujar las dos familias de curvas, respetando las condiciones de frontera y la de ortogonalidad, se obtendrá una aproximación a la solución del problema, esta aproximación es lo suficientemente buena para los fines ingenieriles y da soluciones ventajosas con respecto a las que se obtienen con métodos matemáticos rigurosos ya que son mucho más complicados.

El trazo de la red de flujo comprende en la práctica diferentes pasos, los cuales a continuación se enumeran:

- 1) Delimitación de la zona de flujo que se desea estudiar, analizando sus condiciones de frontera.
- 2) Trazo de dos familias de curvas ortogonales entre sí que satisfagan las condiciones de frontera y que constituyan la solución única de la ecuación de Laplace.

1.2.2. Trazo de la red de flujo. Calculo de gasto

En el libro de Presas de Tierra de Armas Novoa y Horta Mestas (1987) dice que este problema es similar a la representación de curvas de nivel en topografía. La convención más idónea es la siguiente:

- a) Dibujar las líneas de flujo de manera que el gasto que pase por el canal formado entre cada dos de ellas sea el mismo ($\Delta q = cte$).



b) Dibujar las líneas equipotenciales de manera que la caída de carga hidráulica entre cada dos de ellas sea la misma ($\Delta h = cte$).

La figura 1.5 muestra los 2 requisitos anteriores, limitado por las líneas de flujo ψ_i y ψ_j y por las equipotenciales ϕ_i y ϕ_j .

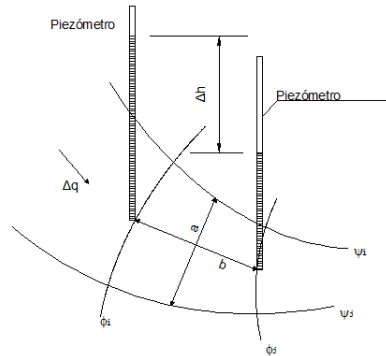


Figura 1.5 Caudal y gradiente en un canal (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).

El gasto por el canal vale según la ley de Darcy:

$$\Delta q = k \cdot a \cdot \frac{\Delta h}{b} \tag{1.13}$$

Si n_f es el número total de los canales de flujo de la red y n_e el número de caídas de potencia. Siguiendo las dos convenciones que se han seguido para dibujar la red de flujo se tiene:

$$\Delta q = \frac{q}{n_f} \quad q : \text{Gasto total}$$

$$\Delta h = \frac{h}{n_e} \quad h : \text{Carga total disipada a lo largo de la zona de flujo.} \tag{1.14}$$

Entonces la ecuación (1.13) puede escribirse como:

$$q = k \cdot h \cdot \frac{n_f}{n_e} \cdot \frac{a}{b} \tag{1.15}$$

Si q, k, n_f , y n_e son constantes $a/b = cte$ O sea que la relación entre el ancho y el largo de todos los rectángulos curvilíneos debe ser la misma. Esta condición implica



que se estén cumpliendo las dos condiciones iniciales (Δq y Δh iguales). Por lo tanto, el único requisito para satisfacer estas dos condiciones es que $a/b = cte$. Si esta constante es igual a 1 el problema se simplifica, los rectángulos se transforman en cuadrados curvilíneos (más fáciles de verificar en cuanto a la corrección de su dibujo), la ecuación (1.15) pasara a la forma:

$$q = k \cdot h \cdot \frac{n_f}{n_e} \quad (1.16)$$

La red dibujada cumplirá la condición de que por cada canal pase el mismo gasto y que entre cada dos líneas equipotenciales haya la misma caída de potencia.

El hecho de que $\frac{a}{b} = 1$ no significa que todos los cuadrados curvilíneos de la red de flujo sean del mismo tamaño.

$$F_f = \frac{n_f}{n_e} \quad F_f : \text{Factor de forma.}$$

∴ La ecuación (1.16) puede ponerse como:

$$q = k \cdot h \cdot F_f \quad (1.17)$$

Esta fórmula permite calcular de manera sencilla el gasto por unidad de longitud normal a la sección estudiada.

Casagrande (1937) proporciona los siguientes consejos a ingenieros inexpertos y a los estudiantes.

1. Úsense todas las oportunidades posibles para estudiar la apariencia de las redes de flujo bien hechas, tratando después de repetir las sin tener a la vista el modelo, hasta obtener dibujos satisfactorios.
2. Usualmente es suficiente trazar la red de flujo con una cantidad de canales comprendidos entre cuatro o cinco. El uso de muchos canales dificulta grandemente en trazo y desvía la atención de los aspectos esenciales.



3. Debe siempre obtenerse la apariencia de la red en conjunto, sin tratar de corregir detalles, hasta que toda ella esté aproximadamente bien trazada.
4. Frecuentemente hay partes de la red en que las líneas de flujo deben ser aproximadamente rectas y paralelas; en ese caso los canales son más o menos del mismo ancho y los cuadrados deben resultar muy parecidos. Puede facilitar el trazo de la red el comenzar por esa zona.
5. Las redes de flujo en áreas confinadas, limitadas por fronteras paralelas (especialmente la superior y la inferior) son frecuentemente simétricas, y las líneas de flujo y las equipotenciales son, entonces, de formas parecidas a las elípticas.
6. Un error común en los principiantes es el de dibujar transiciones muy bruscas entre las partes rectas y las curvas de las diferentes líneas. Debe tenerse presente que las transiciones deben ser siempre muy suaves y de forma parabólicas o elípticas; el tamaño de los diferentes cuadrados debe ir cambiando también gradualmente.
7. En general, el primer intento conduce a una red de cuadrados en toda la extensión de la región de flujo. La caída de potencia entre dos equipotenciales sucesivas correspondientes a un cierto número de canales con el que se intentó la solución, no suele ser una parte entera exacta de la pérdida total de potencial, de manera que al terminar la red suele quedar una última hilera de rectángulos entre dos líneas equipotenciales en la que la caída de carga es una fracción de la Δh que haya prevalecido en el resto de la red. Generalmente esto no es perjudicial y esta última hilera puede tomarse en cuenta para el cálculo de n_e , estimando qué fracción de caída ha resultado. Si, por razones de presentación, se desea que todas las hileras de cuadrados queden con el mismo Δh , podrá corregirse la red, cambiando el número de canales de flujo, bien sea por interpolación o empezando de nuevo. No debe intentarse convertir la hilera incompleta en una de cuadrados por correcciones locales puramente gráfica, a no ser que el faltante o sobrante de espacio en la hilera incompleta sea muy pequeño.
8. Una superficie de salida en la red, en contacto con el aire, si no es horizontal, nunca es ni línea de flujo ni equipotencial, de manera que los cuadrados limitados por esa superficie no pueden ser completos.



Trazado la red de flujo se podrá calcular el gasto con una de las siguientes ecuaciones:

$$q = k \cdot h \cdot \frac{n_f}{n_e} ; q = k \cdot h \cdot F_f$$

Se deberá tener cuidado con las elecciones de n_f y n_e para tomar las dimensiones apropiadas.

1.2.3. Fuerzas de filtración. Gradiente crítico de ebullición

Se producen presiones hidrodinámicas sobre las partículas del suelo cuando el agua empieza a fluir sobre el mismo en la dirección del flujo, este efecto se puede representar por empujes hidrodinámicos en la dirección del flujo a las respectivas líneas.

La magnitud de los empujes hidrodinámicos depende fundamentalmente del gradiente hidráulico prevaleciente.

La presión hidrodinámica que produce el agua sobre las partículas de suelo en la sección a de la figura (1.5) el cuadrado es igual a:

$$h_p = \Delta h \cdot \gamma_w$$

Esta presión produce un empuje hidrodinámico:

$$J = \Delta h \cdot \gamma_w \cdot a$$

Esta fuerza se puede expresar por unidad de volumen:

$$j = \frac{J}{a \cdot b} = \frac{\Delta h \cdot \gamma_w \cdot a}{a \cdot b}$$

$$j = \gamma_w \cdot i$$

La fuerza resultante actuará en la dirección del flujo, en el centroide del volumen del cuadrado y tangente a la línea de flujo que pase por ese punto.

Esta fuerza es independiente de la velocidad del flujo y de su coeficiente de permeabilidad del suelo.

En la tabla 1.1 se muestran valores admisibles del gradiente promedio para diferentes tipos de suelos.



Tipos de suelo	Gradiente admisible i_{adm}
Arcillas	1.2
Arcillas arenosas	0.65
Arenas Gruesas	0.45
Arena media	0.38
Arena fina	0.29

Tabla 1.1 Gradientes admisibles para distintos tipos de suelo (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987)

Otro fenómeno del flujo del agua a través de los suelos es la ebullición de las arenas, es una manifestación del fenómeno de sifonamiento.

El valor del gradiente que se necesita para anular la presión efectiva en suelos granulares, lleva el nombre de gradiente crítico y está dado por:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

1.3. FLUJO DE AGUA A TRAVES DE PRESAS DE TIERRA

Las Presas de Tierra constituyen un caso particular de flujo libre debido a que en éste tipo de flujo no se conoce "a priori" una de las fronteras de la región de flujo, que es el prerequisite básico para aplicar el método gráfico de obtención de la red de flujo.

En la figura 1.6 se distingue que la línea 1-2 es una línea equipotencial debido a que está en contacto suelo y agua, la línea 1-3 es una línea de flujo debido al contacto de material permeable de la presa y estrato impermeable. El resto de fronteras no puede definirse pero razonablemente debe existir una línea de flujo 2-4 bajo la cual se encuentra saturado por el flujo de agua y sobre el cual, descontando una estrecha franja por capilaridad, el suelo permanece seco. Sin embargo la forma de la línea 2-4 y la posición del punto 4 no son conocidas.

La línea 2-4 limita el flujo dentro de la presa de tierra y es conocida como línea de corriente superior, esta línea no es solamente línea de flujo sino que también es una línea de equipresión en la que todos los puntos sobre esta tiene presión atmosférica, en consecuencia las líneas equipotenciales cortaran la línea de corriente superior a intervalos verticales Δh iguales entre sí. Igualmente para la línea 4-3 ya que esta al contacto con el aire. (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987)



Para resolver el problema de flujo la línea de corriente superior debe al menos, ser determinada aproximadamente para poder trazar la red de flujo

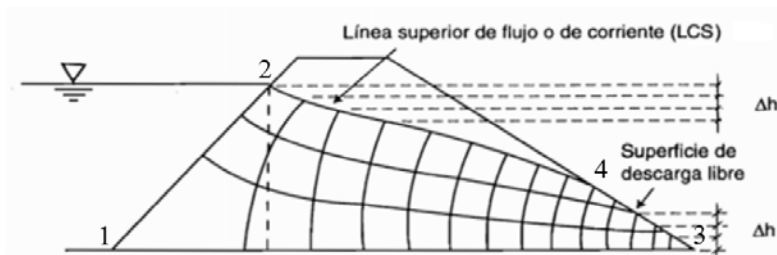


Figura 1.6 Ejemplo de red de flujo a través de una presa de tierra homogénea (Flores Berrones, 2000)

Existen distintos métodos para la determinación de la línea de corriente superior. A continuación se resumen los distintos métodos propuestos por el (U.S. Army Corps of Engineers, 1986).

En 1863, J. Dupuit, propuso las bases para la determinación aproximada de la línea de corriente superior en una sección de presa de tierra homogénea sobre cimiento impermeable, con nivel de agua en ambos taludes, y que históricamente, es la primera que se dispone para tratar problemas de flujo no confinado.

Las hipótesis básicas establecidas por Dupuit son:

- Para pequeñas inclinaciones de la superficie libre de un sistema de flujo (línea de corriente superior) pueden tomarse las líneas de corriente como horizontales en cualquier sección vertical y consecuentemente las líneas equipotenciales como verticales.
- El gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la línea de corriente superior en el punto de que se trate y es constante en cualquier punto de la vertical que se trace por él.

Con estas hipótesis Dupuit llega a una expresión parabólica que representa la línea de corriente superior como se muestra en la figura 1.7, en donde la LCS comienza en el nivel aguas arriba y termina en el nivel aguas abajo. Aunque esta solución carece de aplicación práctica.

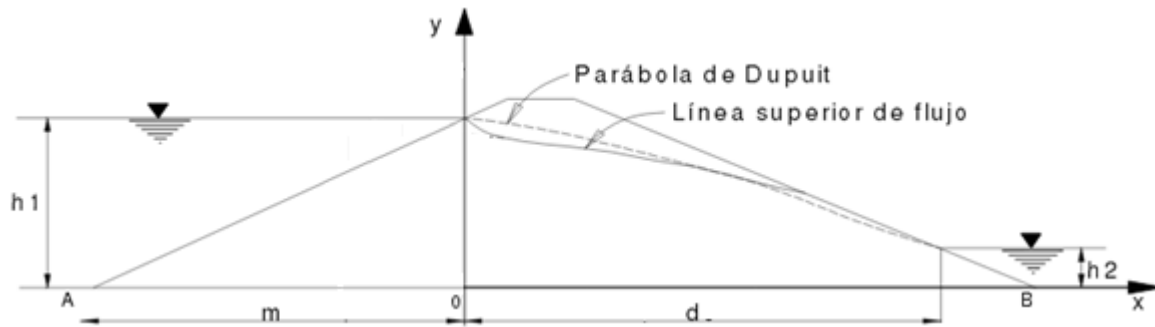


Figura 1.7. Parábola de Dupuit y Cálculo del caudal según la fórmula de Dupuit, (Marsal & Resendiz Nuñez, 1975)

La expresión obtenida por Dupuit no representa correctamente la línea de corriente superior, pues no se ha planteado condiciones de entrada ni de salida de la LCS y esta depende de la geometría de la sección de presa y es independiente de la permeabilidad del material que constituye la región de flujo; más aún, para $h_2 = 0$ la parábola de Dupuit intersectaría la línea de flujo representada por la frontera impermeable AB y esto es inadmisibles pues debe ser diferente de cero para permitir la salida del gasto q . A pesar de estas graves objeciones, se sabe que la fórmula de Dupuit es una expresión rigurosa del caudal para presas con taludes verticales (Hantush, 1962) y que para presas con taludes no verticales, la misma fórmula sorprendentemente da muy buenas estimaciones del gasto real para fines prácticos.

A partir de la solución de Dupuit, aparecen otros autores que han dado solución a problemas prácticos de sección de presa de tierra sobre cimientos impermeables con diferentes diseños de drenaje.

Para drenajes de pie de talud Schaffernak y Van Iterson propusieron en 1916, independientemente, determinar la posición de la línea de corriente superior y mantener las dos hipótesis de Dupuit, pero imponiendo la condición de condiciones de entrada y salida de la LCS.

A. Casagrande, propone que este método se use para cuando el ángulo que forma el talud aguas abajo con la horizontal es menor de 30° , pero resulta que casi en la totalidad de las presas de tierra homogénea con drenaje de pie de talud caen en esta situación.

Para drenajes de colchón en presas de tierra homogénea sobre cimiento impermeable, Kozeny en 1931 da una solución rigurosa de la ecuación de Laplace,



también utilizando las hipótesis de Dupuit y complementando las condiciones de entrada y salida de la línea de corriente superior en los taludes aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

Para drenajes de chimenea en presas de tierra homogénea y para presas con núcleo o pantalla de materiales arcillosos y espaldones de enrocamiento, todos sobre cimientos impermeables, A Casagrande propone soluciones ingeniosas para determinar la posición de la línea de corriente superior, abarcando con ello todos los casos que se presentan en la práctica (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).

1.4. OTROS MÉTODOS APROXIMADOS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE FLUJO

La ecuación de Laplace no solo gobierna el flujo establecido a través de un medio poroso, sino que también para resolver varios problemas de la física aplicada. Ante esta situación se han desarrollado varios métodos aproximados para resolver problemas de flujo como son modelos físicos, modelos analíticos y métodos numéricos y computacionales

El estudio del fenómeno de percolación en estructuras de tierra tiene como objetivo determinar la LCS que delimita una región completamente saturada de otra no saturada, así como el campo de presiones que se desarrolla dentro de la presa (Beneyto, et al., 2005). Durante mucho tiempo estos problemas fueron resueltos de manera gráfica, analítica o numéricamente considerando solo la zona saturada.

Los modelos físicos dan una percepción buena de lo que está ocurriendo durante la filtración y permiten una apreciación física de la reacción del sistema de flujo a los cambios en la carga, en la geometría, y otras suposiciones, estos modelos se lo realizan mediante analogías eléctricas que exigen la construcción de una región de flujo geoméricamente similar, Armas Novoa y Horta Mestas, (1987) indican que este método apareció en las *Memorias Del Primer Congreso De Grandes Presas, Vol IV, Estocolmo, 1933*.

Los métodos analíticos solucionan problemas de flujo mediante transformaciones y mapeos explicado por Harr (1962) para transferir la geometría de un problema de filtración en un plano complejo en otro plano, de esta manera, la geometría de un



problema puede tomarse de un plano donde la solución es desconocida a un plano donde la solución es conocida. Otra solución por métodos analíticos es el método de los fragmentos desarrollado por Pavlovsky (1936, 1956), que permite separar en tramos el problema de flujo para desarrollar el análisis de la filtración en su totalidad.

Los métodos de solución numérica son el método de diferencias finitas y el de elementos finitos, pueden modelar en forma bidimensional o tridimensional. Existen numerosos programas para estos métodos.

En la mayoría de los libros geotécnicos tienen una sección dedicada a la filtración de la que trata sobre cómo construir e interpretar las redes de flujo. A pesar de la aparente simplicidad, la construcción de una buena red de flujo que cumpla con todos los criterios no es una tarea trivial. Afortunadamente, existe disponibilidad de las computadoras y las herramientas de software numéricos, que proporcionan soluciones numéricas que ayudan a obtener resultados con mayor rapidez y facilidad que la construcción de una red de flujo. Por otra parte, una solución numérica proporciona toda la información que se puede obtener a partir de una red de flujo y mucho más. Además, los análisis numéricos pueden proporcionar soluciones para situaciones altamente complejas para los que no es posible construir una red de flujo. Redes de flujo, por ejemplo, son casi imposibles de construir para un estratigrafía compleja o cuando hay tanto flujo saturados e insaturados, o cuando el flujo es transitoria. Con una herramienta de software como SEEP / W este tipo de situaciones se puede considerar fácilmente en un análisis de la filtración. (Krahn, 2012)

La localización de la LCS no es conocida a priori, necesiándose un proceso iterativo para poder determinarla por los métodos numéricos y computacionales. Esta iteración puede hacerse de diversas maneras, por ejemplo, puede usarse una malla fija y separar los nodos en activos e inactivos dependiendo del fluido existente en el punto considerado (Bathe & Khoshgoftaar , 1979).



1.5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas Ingenieriles que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero resolver infinidad de problemas. Sin embargo, es un método que no proporciona la solución exacta a un problema dado, sino que, en realidad, proporciona una solución aproximada. Este método se basa en el modelo de malla (no necesariamente rectangular) que divide la región de flujo en elementos discretos y proporciona N ecuaciones con N incógnitas. Para cada elemento se especifican sus propiedades, como la permeabilidad, y se establecen las condiciones de borde (cargas y caudales). Se resuelve el sistema de ecuaciones para determinar las cargas en los nodos y caudales en los elementos.

La ecuación fundamental del flujo bidimensional y anisótropo:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1.18)$$

Pudiéndose plantear una ecuación funcional que es:

$$I = \frac{1}{2} \iint_{Area} \left[k_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \right] dy dx \quad (1.19)$$

Si se encuentra la función h que satisface las ecuaciones de borde y minimice esta funcional al plantear la solución será equivalente a encontrar la solución exacta de la ecuación de Laplace. (Armas Novoa & Horta Mestas, 1987).

Minimizar implica plantear: $\partial I / \partial h = 0$

Solución del método de elementos finitos:

La solución plantea discretizar o dividir la sección de flujo en pequeñas áreas de geometría definida donde son válidas las ecuaciones 1.18 y 1.19.

Estas áreas pueden tener propiedades de permeabilidad diferentes. La ecuación 1.18 y 1.19 se puede formular de forma matricial al suponer una función interpolación que, dentro de una de las pequeñas áreas, del valor de la variable h



en función de los valores de h_n en los nudos del área, la solución queda de la siguiente forma:

$$[K_e]\{h_n\} = 0 \tag{1.20}$$

Donde:

$$[K_e] = \frac{1}{2} \iint_{Area} [B]^T [R][B] dArea \tag{1.21}$$

$\{h_n\}$ = lista de cargas nodales

Las áreas se denominan elementos finitos, pueden ser triangulares o cuadriláteros de varios nodos, el número de nodos en el elemento es debido a la función de interpolación (la solución es más precisa mientras más nodos tenga el elemento) y por tanto la matriz dada por la ecuación 1.21 dependerá de la discretización de los elementos.

Al ensamblar la matriz de rigidez $[K_e]$ de cada elemento en una matriz $[K]$ de todo el sistema se puede resolver y obtener las cargas para cada uno de los elementos, ya que se podría plantear el sistema:

$$[K]\{H\} = 0$$

Donde:

$$[K] = \sum_n [K_e]$$

$\{H\}$: Vector de todos los nodos del problema en los que se incluye aquellos con carga conocida.

Los sistemas formados son demasiado grandes para solucionar manualmente, por lo tanto requiere de uso de computadores que automáticamente realizan:

1. Construyen la matriz de rigidez de cada elemento $[K_e]$
2. Utilizan la posición de cada nudo y ensambla la matriz $[K]$
3. Plantean la solución del sistema: $[K]\{H\} = 0$



Pero como:

$$\begin{bmatrix} Kd & K^T \\ K^{*T} & Kc \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Hd \\ Hc \end{Bmatrix} = 0$$

Entonces:

$$[Kd]\{Hd\} = -[K^*]\{Hc\}$$

La solución resulta una lista de todas las cargas h del problema. Entonces se podrá calcular los gradientes en cualquier nodo, como también el gasto en la sección deseada.

El método de elementos finitos tiene varias ventajas sobre el método de diferencias finitas para los problemas de infiltración más complejos. Radhakrishnan (1978) indica las siguientes ventajas:

- Se pueden estudiar con gran facilidad geometrías complejas con capas de suelos inclinadas.
- Se pueden modelar con precisión, variando el tamaño de elementos, zonas donde los gradientes de infiltración o las velocidades son altos.
- Se puede modelar porciones de suelo dentro de capas.



CAPÍTULO 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

En marzo del 2008 se aprobó el proyecto Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de Los Ríos PACALORI, que a través de grandes obras hidráulicas permitirá el almacenamiento de agua para la utilización en riego y para el control de inundaciones. El proyecto tiene una extensión de 1900km², delimitada por los ríos Calabí, Quevedo y Macul y está ubicado en el centro de la provincia de Los Ríos.

El proyecto se hace, ya que la provincia de los Ríos presenta un desequilibrio en la distribución de sus recursos hídricos, que presenta dos marcadas estaciones; en los meses de enero-mayo ocurren inundaciones y en el verano julio-diciembre ocurren sequías.

Actualmente el proyecto PACALORI se encuentra en la etapa de Factibilidad, que comprende la construcción de un total de 13 presas de tierra que son: Macul 1, Maculillo, Macul 2, Mocache, Garzas, Mangas-Saibas, La Angostura, Lechugal 2, Chojampe, Chojampe2, Estero Lechugal, Aguacatal y Pueblo Viejo.

Los embalses de estas presa de tierra almacenarán un volumen total de 848,4 Hm³ agua, que abastecerán un área de riego de 105739 ha a ser aprovechada por un periodo de 4 meses comprendidos entre julio y octubre. También se considerará 33.8 km de túneles para conducciones en los trasvases. (PROMAS, 2013a). El Anexo 1 muestra un mapa de la ubicación general de los embalses que pertenecen al proyecto.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Como ya se manifestó anteriormente el proyecto PACALORI es un proyecto con el objetivo de riego y control de inundaciones y para ello se construirán 13 presas de tierra, en las cuales será de vital importancia el análisis y la modelación de la filtración de cada una de ellas, con y sin medidas contra filtraciones, por los tanto el objetivo de este estudio es analizar los gastos de filtración y el gradiente hidráulico



de las 13 presas y compararlas con el gasto ecológico, las trece presas están dentro de las trasvase 1 y 2, estas se muestran en la Tabla 2.1.

TRASVASE 1	TRASVASE 2
MACUL1	CHOJAMPE 2
MACULILLO	CHOJAMPE
MOCACHE	AGUACATAL
MANGAS SAIBAS	E LECHUGAL
MACUL 2	LECHUGAL2
ANGOSTURA	PUEBLO VIEJO
GARZAS	

Tabla 2.1 Presas a analizar (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2014)

2.2.1. Ubicación

El área del Proyecto PACALORI, está localizado en la costa ecuatoriana, provincia de Los Ríos como se observa en la figura 2.1, está limitada por el norte con la provincia Santo Domingo de los Tsáchilas, al este por Cotopaxi y Bolívar, al oeste y sur por la provincia del Guayas, dentro de estos límites se encuentra el cantón Vinces.

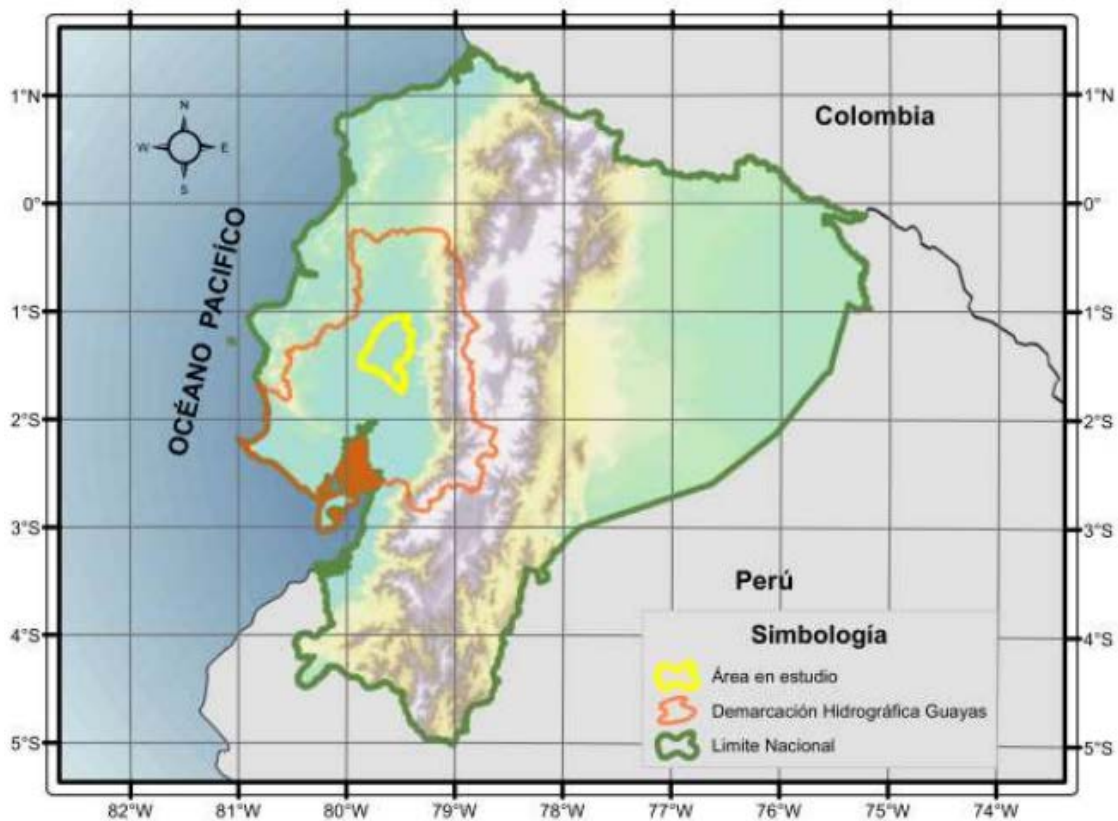


Figura 2.1 Ubicación del área del proyecto (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2013)



2.2.2. Geología

El área del Proyecto, Geológicamente está constituida de secuencias sedimentarias, que van del Plioceno al Cuaternario Reciente, La Geología ha sido tomada del informe de factibilidad de Geología y Geotecnia del Proyecto PACALORI los mismos que están fundamentados de la siguiente Información de base revisada hasta la actualidad:

- El mapa geológico digital de todo el país a escala 1:100.000 elaborado por la SEMPLADES.
- El mapa Geomorfológico elaborado por el CLIRSEN escala 1: 25.000, como también la información Geomorfológica escala 1: 250.000 de todo el país elaborado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería del 2003.
- El Mapa de Fallas y Pliegues Cuaternarios del Ecuador Continental y Región Insular, Levantado por y el U.S. Geological Survey, y la Escuela Politécnica Nacional a escala 1:250.000, año 2003 Registro Sismológico del Ecuador desde 1988 hasta 2011, elaborado por el Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional (EPN).
- Mapas y Cartografía en general, elaborados mediante SIG por la Unidad de Geomática del PROMAS.
- Levantamientos Topográficos a escala 1:10.000
- Informe de Prefactibilidad.
- Imágenes Satelitales del área de las presas Macul 1, Maculillo, Mocache, Macul 2, La Angostura, 4 Mangas-Saibas y Garzas.

2.2.3. Geología Regional

La Geología del área del Proyecto PACALORI, corresponde a una Planicie costanera, parte de la cuenca del río Guayas. Esta Planicie es una cuenca de sedimentación, que puede asumirse como una cuenca subandina, (Guaranda y Muñoz, 2008). Estas cuencas son asimétricas que en su mayoría está constituida por la acumulación de materiales de conos de deyección, terrazas indiferenciadas, bancos de arcillas y limos, intercalados con bancos de arena y gravas poco consolidadas que rellenan la gran planicie de la cuenca Alta y Media del río Guayas.



2.2.3.1. Características geológicas en el lugar de emplazamiento de las presas

Para las presas de la trasvase 1 los estudios de factibilidad del proyecto PACALORI indicaron las siguientes características:

- **Presa Macul 1**

La presencia de materiales de diferente color, pero con texturas, granulometría y propiedades similares sugieren que la cobertura de mayor parte del área del reservorio este formado por suelos arcilloso y limo-arcilloso con plasticidad moderada a alta. Los colores marrón rojizo y marrón amarillento predominan sobre los de color grisáceos, sin embargo, en las perforaciones realizadas las capas de arcilla gris-blanquecino son más frecuentes, lo que sugiere que los materiales de superficie sean probablemente suelos residuales y muy meteorizados, y que al parecer corresponden a cenizas y tobas trasportadas por el viento y depositadas en capas de espesor centimétrico y que pueden alcanzar unos pocos metros.

- **Presa Maculillo**

La presencia de materiales de diferente color, pero con texturas, granulometría y propiedades similares sugieren que la cobertura de mayor parte del área del reservorio este formado por suelos arcilloso y limo-arcilloso con plasticidad moderada a alta. Los colores marrón rojizo y marrón amarillento predominan sobre los de color grisáceos, sin embargo, en las perforaciones realizadas las capas de arcilla gris-blanquecino son más frecuentes, lo que sugiere que los materiales de superficie sean probablemente suelos residuales, transportados y muy meteorizados, y que al parecer corresponden a cenizas y tobas trasportadas por el viento y depositadas en capas de espesor centimétrico y que pueden alcanzar unos pocos metros.

Los resultados de los ensayos de laboratorio, la descripción gráfica y la prueba SPT. Básicamente en la presa Maculillo, se puede observar intercalaciones de limos y arenas.



- **Presa Mocache**

La interpretación de los resultados de ensayos de campo y en laboratorio de las muestras de perforación, permiten comprender la disposición de las capas. Básicamente en la presa Mocache, se puede observar la presencia de limos y arenas aparentemente interestratificada.

- **Presa Mangas-Saibas**

En las perforaciones: uno, dos y tres se encontraron algunos metros de arenas sueltas, de características tipo aluvial. Estas arenas no fueron encontradas en la perforación 4 muy a pesar que se alcanzó aproximadamente la misma profundidad que las anteriores. La primera capa tiene un espesor de cinco metros, que varía un poco en la perforación 3, donde alcanza doce metros de espesor, corresponde a los suelos superficiales muy meteorizados, comprenden limos arcillosos de color marrón en diferentes tonalidades principalmente rojizas.

- **Presa Macul 2**

Existen depósitos de grandes cantidades de aluvial que se encuentra distribuido sobre áreas bastante planas El depósito aluvial, en el área del reservorio tiene un ancho que alcanza alrededor de los cuatro kilómetros que claramente dice la amplitud de la deposición. Se aprecian en la parte central islas de material diferente, que es duro y consolidado pertenecientes sin duda al formación Balzar.

- **Presa Angostura**

El sector se encuentra en la parte sur del área del proyecto, en una zona donde comienza a presentarse los depósitos que conforman la planicie aluvial de la Cuenca del Guayas.

En menor proporción se presentan las terrazas indiferenciadas conformadas por limos arenosos de color marrón rojizo.



- **Presa Garzas**

Debido a las plantaciones de banano y maíz, el acceso a este lugar es limitado; no se encontró afloramientos entre la ciudad de Mocache y Jauneche. En las proximidades este último poblado se realiza al momento movimiento de tierras en la vía, por lo que pudo observar suelos marrón areno-limosos.

El sector se encuentra influenciado por la presencia de terrazas con limos de color marrón rojizo, arenosos.

Para las presas de la trasvase 2 los estudios de factibilidad del proyecto PACALORI indicaron las siguientes características:

- **Presa Chojampe 2**

La geología del sector es parecida a la mantenida en toda el área del proyecto. Los suelos predominantes en este sector son limos arcillosos de alta plasticidad. De los resultados de observaciones de campo realizados en las cercanías de Pueblo Viejo, se observa un promedio de limos de alta y baja plasticidad; los suelos no plásticos constituyen un porcentaje menor y están clasificadas como: arenas y limos no plásticos.

- **Presa Chojampe**

La geología del sector es parecida a la mantenida en toda el área del proyecto. Los suelos predominantes en este sector son limos arcillosos de alta plasticidad. De los resultados de observaciones de campo realizados en las cercanías de Pueblo Viejo, se observa un promedio de limos de alta y baja plasticidad; los suelos no plásticos constituyen un porcentaje menor y están clasificadas como: arenas y limos no plásticos.

- **Presa Aguacatal**

En este sector se observaron los suelos marrón rojizo, característicos del área del proyecto. En el talud de una carretera se encontró 2 metros superiores son de limo arcilloso de color marrón rojizo, 3 metros de un conglomerado con



matriz arenosa, con clastos de hasta los 5 cm y una capa inferior de arena limosa, de color marrón amarillento a rojizo.

- **Presa Estero Lechugal**

El sitio corresponde a terrazas de pendientes bajas con suelos limo-arcillosos color marrón rojizo no consolidado. La vegetación, que consiste en gran parte en cultivos de ciclo corto, modifica gran parte de los suelos, presentando características con contenido orgánico y arenoso.

- **Presa Lechugal 2**

En este sector existen suelos marrón rojizo, característicos del área del proyecto. En el talud de una carretera se encontró 2 metros superiores son de limo arcilloso de color marrón rojizo, 3 metros de un conglomerado con matriz arenosa, con clastos de hasta los 5 cm y una capa inferior de arena limosa, de color marrón amarillento a rojizo.

- **Presa Pueblo Viejo**

El área se caracteriza por terrenos sedimentarios indiferenciados y depósitos aluviales modernos; los terrenos corresponden a las terrazas indiferenciadas. Los sedimentos son poco consolidados, limo-arenosos, de arenas muy finas y con pequeños porcentajes de micas alteradas. La coloración de los limos es de color marrón rojizo, de consistencia blanda y plástica.

Los resultados de las perforaciones realizadas en el estudio de factibilidad del proyecto PACALORI, muestran una calidad muy mala de la roca existente. Además afirman que existen capas resistentes. Pero que, al continuar la perforación por rotación, se ha encontrado estratos en donde la consistencia es baja y en algunos casos, se encuentra material suelto, por este motivo para el análisis de filtraciones se considera como un estrato de profundidad semi-infinita y para la simulación en el software Seep/W se considerara cuya potencia alcanza a los 100m. Esto es, ya que por debajo de este el flujo es insignificante.



2.3. DATOS DE LAS PRESAS

2.3.1. Recolección y preparación de datos

El proyecto PACALORI se encuentra en etapa definitiva, en donde se tiene la información necesaria para la modelación de la filtración para las 13 presas de tierra. Son necesarios los siguientes datos:

- Topografía del lugar de emplazamiento de las presas.
- Nivel de operación o nivel de cresta de los vertederos de exceso. (Nivel de aguas normales, NAN).
- Geometría de las presas de tierra homogéneas.
- Características generales y propiedades mecánicas de los materiales

Estos datos son proporcionados por los Estudios de Factibilidad del proyecto realizado por el PROMAS.

2.3.1.1. Topografía del lugar de emplazamiento de las presas.

La topografía del lugar del emplazamiento de las presas es necesaria, ya que se requiere los perfiles del cierre de la presa para calcular aproximadamente el gasto de filtración, y así poder compararlo con el caudal ecológico que se requiere aportar, según el informe de factibilidad “Tomo 3 Climatología, Hidrología y Sedimentología” para el proyecto PACALORI.

Para el análisis de filtración se han considerado 3 secciones transversales a lo largo del cierre de presa para el cálculo aproximado del caudal total por filtración, debido a que el software empleado permite el análisis bidireccional, como también las secciones transversales de las presas no son constantes, en la figura 2.2 se observa este criterio aplicado a la presa Maculillo.

Las secciones transversales seleccionadas han sido:

1. La sección central tiene una carga hidráulica H similar a lo largo de toda la longitud L , y esta carga hidráulica es igual al nivel de aguas normales, estos datos son proporcionados por el PROMAS
2. Para los márgenes izquierdo y derecho se calcularán las cargas hidráulicas H_1 y H_2 , estas cargas hidráulicas son representativas a lo largo de L_{DER} y L_{IZQ} respectivamente.

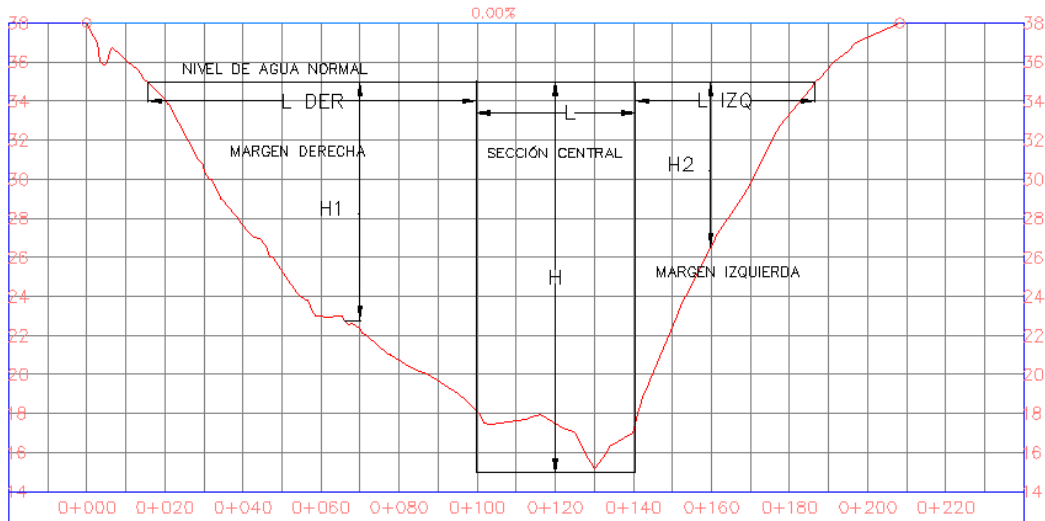


Figura 2.2 Cierre de la Presa Maculillo (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2014)

Los resultados obtenidos para definir la geometría de las secciones para los márgenes izquierdo y derecho, así como también las longitudes de aportación necesarias para el cálculo del caudal aproximado para cada una de las presas se muestra en el Anexo 2

2.3.1.2. Nivel de operación o nivel de cresta de los vertederos de exceso. (Nivel de Aguas Normales, NAN)

Estos son datos necesarios para la modelación de la filtración en las presas de tierra proporcionados por el PROMAS y nos indica la carga hidráulica máxima que tendrá la presa. En la tabla 2.2 se muestra las cargas hidráulicas que tendrá cada presa en su sección máxima.

Presas	carga hidráulica (m)
Macul 1	18.00
Maculillo	20.00
Macul 2	14.00
La Angostura	11.00
Mangas Saibas	12.00
Mocache	18.00
Garzas	19.00
Chojampe 2	10.00
Chojampe	10.00
Estero Lechugal	5.00
Lechugal 2	17.00
Pueblo Viejo	11.00
Aguacatal	12.00

Tabla 2.2 Cargas hidráulicas máximas en las presas (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2014)



2.3.1.3. Geometría de las presas de tierra homogéneas.

Los datos de los diseños preliminares de las presas del proyecto PACALORI, son proporcionados por el PROMAS en la tabla 2.3 se muestra las pendientes de los taludes aguas arriba y aguas abajo, la altura de la presa que es la diferencia entre la cota de coronación y la del punto más bajo de la superficie general de cimientos, sin tener en cuenta obras circunstanciales, tales como rastrillos, pantallas de impermeabilización o rellenos de grietas, la longitud del cierre de las presa que es la distancia a lo largo de la corona, la longitud de base de presa que es la distancia transversal en el punto más bajo de la superficie general de cimientos, sin tener en cuenta obras circunstanciales, tales como rastrillos, pantallas de impermeabilización o rellenos de grietas.

Cabe resaltar que el ancho de corona de presa es la misma para todas e igual a 8.60m debido al diseño de la vía.

Presa	Longitud del cierre (m)	Volumen de embalse (Hm ³)	Altura de presa (m)	Talud aguas arriba	Talud aguas abajo	Longitud de base de presa (m)
Macul 1	143.4	57	21	3	2.5	124.14
Maculillo	202.6	136	23	3	2.5	135.14
Macul 2	228.3	51.4	17	3	2.5	102.14
La Angostura	206.4	39.2	14	3	2.5	78.64
Mangas Saibas	181	180	15	3	2.5	91.14
Mocache	217.4	26.6	21	3	2.5	124.14
Garzas	229	45.6	22	3	2.5	129.64
Chojampe 2	222.8	19.4	13	2.5	2.5	73.64
Chojampe	217.2	105	13	3	2.5	80.14
Estero Lechugal	131.2	13.4	8	2.5	2.5	48.64
Lechugal 2	484.5	70	20	3	2.5	118.64
Pueblo Viejo	517.7	86	11	2.5	2.5	85.64
Aguacatal	299.1	18.5	15	2.5	2.5	83.64

Tabla 2.3 Características de geometría de las presas (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2014)



2.3.1.4. *Características generales y propiedades mecánicas de los materiales*

Para el estudio de la filtración es necesario conocer las permeabilidades de los materiales. La permeabilidad del cimientado, donde se construirán las presas, se ha asumido en función de los resultados del ensayo Lefranc de perforaciones realizadas en el cierre de la presa, de los materiales extraídos de dichas perforaciones y de las calicatas realizadas en los supuestos sitios de préstamos. A estos últimos materiales se le han realizado ensayos físicos en Laboratorios de Suelos, con los cuales, mediante tablas existentes en la Literatura Técnica, se han asumido valores conservadores del coeficiente de permeabilidad. También se ha asumido permeabilidades horizontales y verticales iguales ($k_x = k_y$), tanto para el material compactado de la cortina, como para el material natural del cimientado.

Dentellón

La función del dentellón, de material de la cortina compactado, además de permitir conocer los materiales naturales del cimientado, en la excavación que se requiere, y permitir una mejor unión de los materiales de la cortina con los del cimientado, sirve para alargar el flujo de filtración y con ello reducir el gasto de filtración a través del cimientado y los gradientes hidráulicos a la salida del flujo en el talud aguas abajo. La construcción de este elemento, en presas de tierra es de obligatorio cumplimiento.

Los mismos fueron dimensionados en la etapa de Factibilidad del proyecto PACALORI y poseen una geometría trapezoidal, cuyas dimensiones se muestran en la figura 2.3

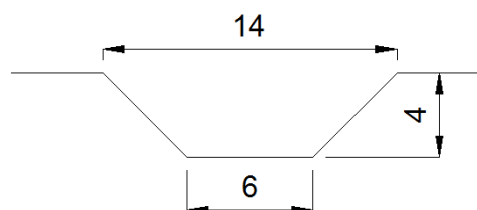


Figura 2.3 Dimensiones del dentellón



Pantallas de Impermeabilización

La experiencia en el uso de pantallas contra filtraciones a través del cimientado muestra que, para que las mismas sean eficientes en cuanto a la reducción del gasto de filtración, deben interceptar por completo el espesor del estrato permeable y embeberse en el estrato inferior impermeable. Sin embargo, por la profundidad de los estratos permeables en la región de la provincia de los Ríos, según la Geología Regional y las perforaciones realizadas en los emplazamientos de las presas del proyecto PACALORI, no es posible construir pantallas contra filtraciones que corten totalmente el estrato permeable, por lo que las pantallas que se consideraran serán las denominadas pantallas colgantes.

Para analizar la eficiencia de las pantallas colgantes, con relación a la reducción del gasto hemos propuesto alcanzar con las mismas profundidades de 12m, 19m y 25m. La construcción de pantallas de hormigón plástico son costosas y la experiencia en su aplicación aconseja profundidades hasta 25m.

Las pantallas de hormigón plástico de bentonita cemento es una mezcla de una pequeña cantidad de bentonita con una cantidad variable de cemento, a la que también puede mezclarse con arcilla, estas mezclas llegan a coeficientes de $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ o incluso superiores.

Otro aspecto negativo de las pantallas de hormigón plástico, además de lo costosas (600\$/m² para espesores de 0.80m), es el tiempo requerido para su ejecución y que no es posible realizar los trabajos de movimiento de tierra para la construcción de la cortina hasta que no se termine los trabajos de construcción de la pantalla.

Geomembrana

La aplicación de geomembrana en otros proyectos en el Ecuador, como el Proyecto Baba (hidroeléctrica), nos hizo pensar en esta solución, como medida contra filtraciones a través del cimientado, en las presas de tierra del Proyecto PACALORI.



La geomembrana se coloca en la unión del cimiento y la cortina, desde el dentellón hasta una longitud a partir del pie del talud aguas arriba, se ha propuesto longitudes de: 0m, 50m y 100m, para analizar la eficiencia de la geomembrana.

Esta solución además de ser menos costosa que las pantallas de hormigón plástico (la geomembrana de polietileno de alta densidad, PEAD, lisas con 1.5mm de espesor, en Brasil, cuestan 10\$/m² y la instalación es del orden de 2\$/m²), a diferencia de las pantallas contra filtración estas tienen ventaja en el tiempo de construcción y permiten la realización del movimiento de tierra para la construcción de la cortina al mismo tiempo que se coloca la geomembrana, además alcanzan permeabilidades de $1 \times 10^{-13} \text{ m/s}$.

Los valores de permeabilidad asumidos para los materiales ya mencionados que intervienen en la modelación se muestran continuación se muestran, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..4**

Material	k (m/s)
Terraplén	1.00E-08
Cimiento	1.00E-05
Pantalla	1.00E-10
Geomembrana	1.00E-13

Tabla 2.4 Permeabilidades para los materiales de las presa

2.4. MODELACIÓN EN SEEP/W

Para el análisis de medidas contra filtración en presas de tierra se requiere realizar diversas modelaciones para finalmente llegar a un resultado que sea factible aplicarse al proyecto PACALORI. Para el análisis del gasto por filtración para las presas con las diferentes medidas contra filtración ya mencionadas, se definió las siguientes alternativas para la modelación del gasto de filtración y gradiente hidráulico:

Alternativa 1. Presa con dentellón de “arcilla” como se muestra en la figura 2.4

Alternativa 2. Presa con pantalla de hormigón plástico de 80cm de espesor y profundidad de h=12m



Alternativa 3. Presa con pantalla de hormigón plástico de 80cm de espesor y profundidad de $h=19\text{m}$

Alternativa 4. Presa con pantalla de hormigón plástico de 80cm de espesor y profundidad de $h=25\text{m}$

La geometría para las alternativas 2, 3 y 4 se presentan en la figura 2.5

Alternativa 5. Presa con geomembrana hasta $L=0\text{m}$ a partir del pie de talud aguas arriba

Alternativa 6. Presa con geomembrana hasta $L=50\text{m}$ a partir del pie de talud aguas arriba

Alternativa 7. Presa con geomembrana hasta $L=100\text{m}$ a partir del pie de talud aguas arriba.

La geometría para las alternativas 5, 6 y 7 se presentan en la figura 2.6

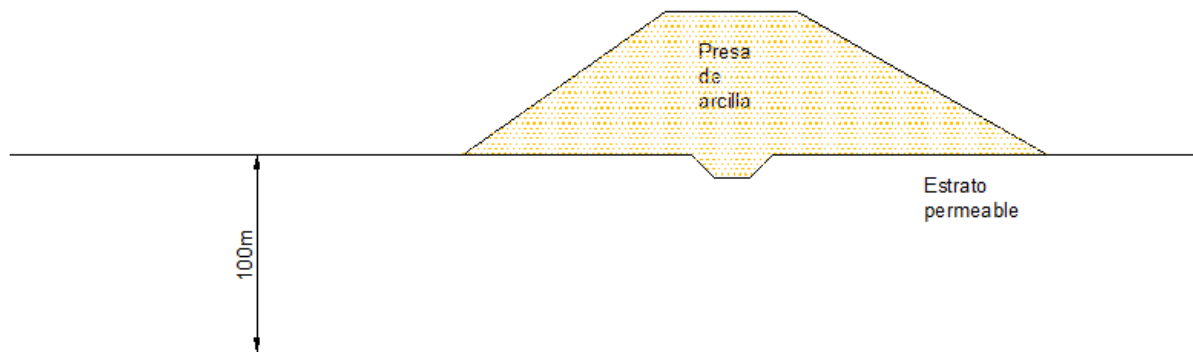


Figura 2.4 Geometría de la Presa con dentellón de arcilla

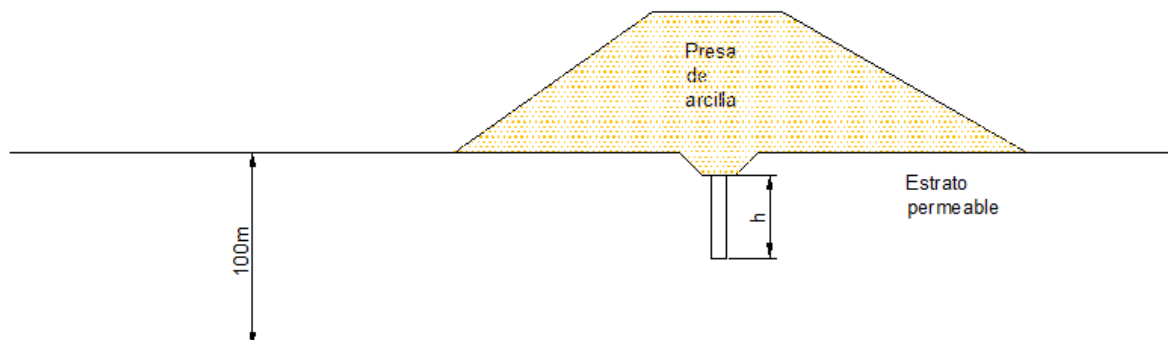


Figura 2.5 Geometría de la presa con pantalla colgante de hormigón plástico

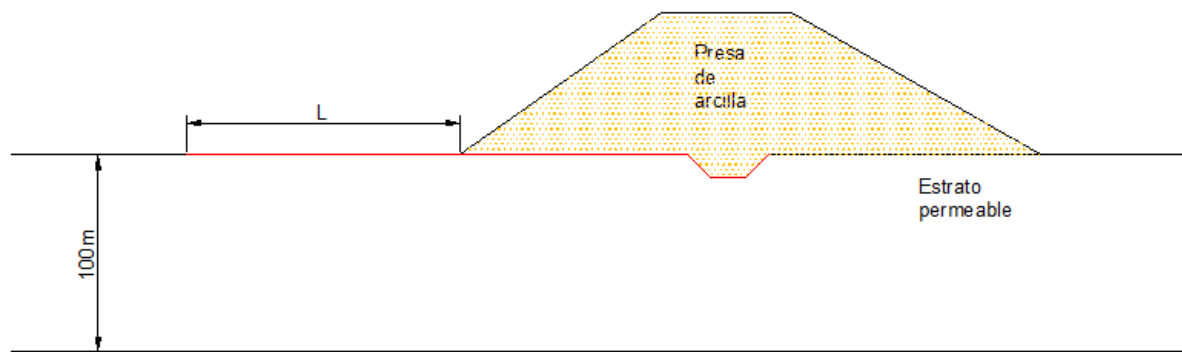


Figura 2.6 Geometría de la presa con geomembrana

2.4.1. Principales pasos a seguir para la modelación de la filtración con SEEP/W:

El libro realizado por Krahn (2012) acerca de cómo modelar, describe cómo resolver problemas ingenieriles de filtración utilizando una potente calculadora; SEEP / W. Los detalles de cómo usar los distintos comandos y características de SEEP / W del programa se dan en la ayuda en línea dentro del software y los puntos a seguir más importantes para la modelación es la siguiente:

1. Definición del problema.

Para la definición completa del problema necesitamos los siguientes datos:

- Geometría del problema
- Valores de la permeabilidad de los distintos terrenos.
- Condiciones de contorno, altura piezométrica, caudal filtrado, zonas impermeables etc.

2. Definición de la geometría y el área de trabajo.

Se debe tener un bosquejo de las dimensiones exactas de la filtración a modelar antes de utilizar el programa. Se inicia el GeoStudio en el modo SEEP/W.

En la barra de herramientas se tiene *Set: Page, Units and Scale* son comandos usadas para definir el área de trabajo y las unidades a utilizar.

En *View/Preferences* es utilizado para cambiar el modo en que la geometría y las fuentes son mostradas.



El SEEP/W trabaja con regiones que son áreas de secciones definidas, como ejemplo en una modelación de la filtración de presas de tierras homogéneas una región sería la presa ya que tiene dimensiones y propiedades del material conocidas, a estas regiones se les pueden asignar materiales y condiciones de contorno.

Para el dibujo de las regiones se debe ingresar los puntos de la geometría del problema de filtración con respecto al eje ya dibujado con el comando *KeyIn/Points*, una vez ingresado los puntos las regiones se pueden dibujar utilizando el comando *KeyIn/Regions*, donde se añade una nueva región con los puntos que la forman o se pueden formar las regiones mediante líneas que unen los puntos de una región

3. Definición de las propiedades y su asignación a regiones.

El menú *Draw / Materials* sirve para asignar las permeabilidades del suelo y aplicarlas a las regiones del dibujo. En suelos anisótropos, es necesario especificar el valor de la permeabilidad horizontal k_x como la conductividad saturada y de k_y/k_x cómo la proporción de conductividad, que es generalmente menor o igual a uno.

4. Definición de las condiciones limites o condiciones de contorno.

Asignar las condiciones de contorno del problema a resolver se logra a través de *Draw / Boundary Conditions*. En estos casos, definir líneas equipotenciales en los límites de aguas arriba y abajo y dar los valores de presiones totales, utilizando el eje horizontal como referencia. Una vez que una condición de frontera se crea, se la puede asignar a un punto, línea o región.

5. Definición de los elementos finitos de la malla.

Se utiliza el comando *Draw/Mesh Propertiles* para proceder a la modificación o a la creación de la malla del modelo de elemento finito, dicha malla puede ser variada ajustando su tamaño del elemento y así como la forma del mismo.



6. Solución del problema.

Una vez realizado las pasas del 1 al 5 se puede solucionar el problema, se utiliza el comando *Tools / Verify* para verificar la definición del problema antes de su solución.

7. Visualización de los resultados.

La ventana *Contour* mostrará los contornos de las líneas equipotenciales. Desde *Draw / Contours* se pueden variar los intervalos y los colores, el comando *Draw / Contour Labels* muestra el valor del contorno que se desea analizar.

2.4.2. Método de análisis

El análisis de filtración de los diversos materiales que conforman el cuerpo y cimentación de la presa, se ha utilizado el módulo SEEP/W de Programa Geo-Studio 2004.

SEEP/W es un software que permite al usuario utilizar técnicas de elementos finitos como herramienta numérica, para analizar el flujo en un modelo bidimensional a través de medios porosos, en el que permite asignar condiciones de borde al modelo y propiedades específicas a los materiales.

El programa está formulado solo para flujos gobernados por la ley de Darcy, mediante la cual la cantidad de agua que pasa a través de un medio poroso es proporcional a la permeabilidad del medio, al gradiente hidráulico y al área a través de la cual discurre el flujo.

La modelación de las 13 presas es extensa para ser mostrada en este apartado, por lo que se mostraran los resultados del cálculo del gasto de filtración para cada una de las presas en el Anexo 3.



CAPÍTULO 3

3. APLICACIÓN, CÁLCULO Y RESULTADOS

3.1. MODELACIÓN EN SEEP/W DE LA PRESA DE MACULILLO

Se mostrara las el resultado de la modelación en SEEP/w de las 7 alternativas para la filtración de la presa de Maculillo ya que esta presa es una de las más grandes del proyecto PACALORI.

Condiciones de Borde.

Las condiciones para esta presa de tierra tomando en cuenta la geometría establecida en la etapa de Factibilidad del Proyecto PACALORI es:

Condición aguas arriba: Se ha establecido que la altura piezométrica sobre el estrato aluvial es de 20m.

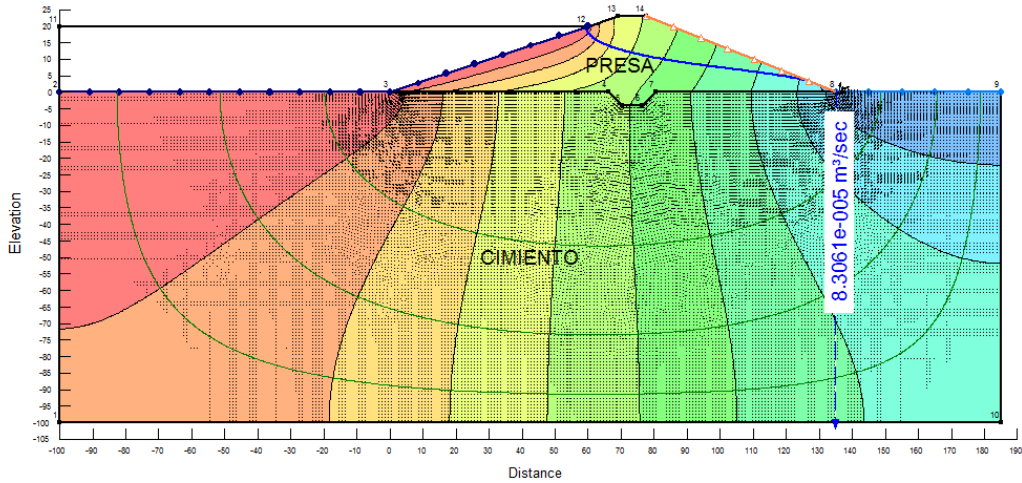
Condición aguas abajo: la altura piezométrica aguas abajo es igual a 0m, por lo que se ha puesto como condición de frontera la presión atmosférica.

El programa SEEP/w determina la posición de la línea de corriente superior, el caudal de filtración por metro lineal a través de la presa y de los estratos permeables del cimiento (aluvión y macizo rocoso), así como otros parámetros importantes: velocidades, presiones y gradientes, a través de la técnica de elementos finitos.

A continuación se detallan los casos analizados de acuerdo a las siete variantes propuestas y se muestran los resultados del gasto de filtración por metro lineal de estructura, utilizando el programa SEEP/w.



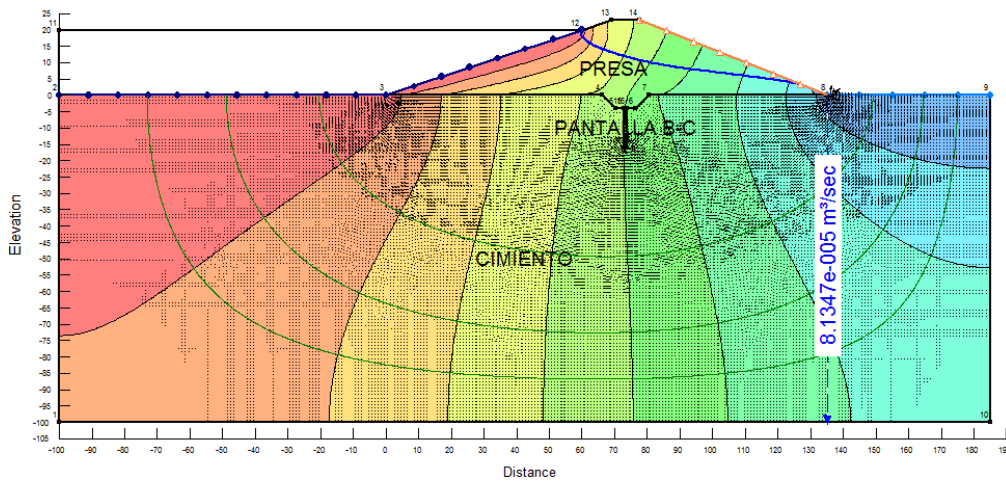
Alternativa 1: Presa con dentellón de “arcilla”



Gasto de filtración: $q= 8.31E-02$ l/s

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.94

Alternativa 2: Presa con pantalla de hormigón plástico de 80cm de espesor y profundidad de $h=12m$

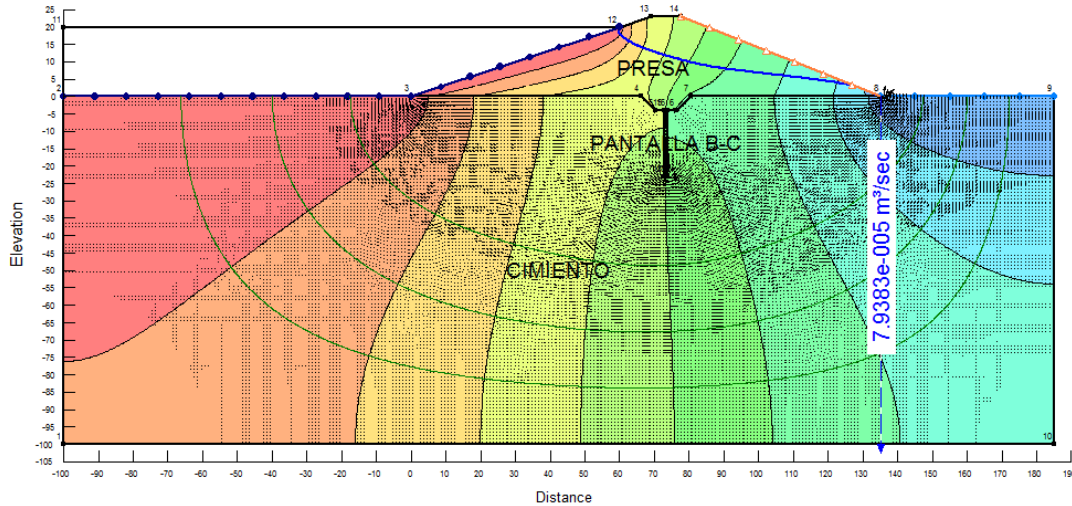


Gasto de filtración: $q= 8.13E-02$ l/s

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.86



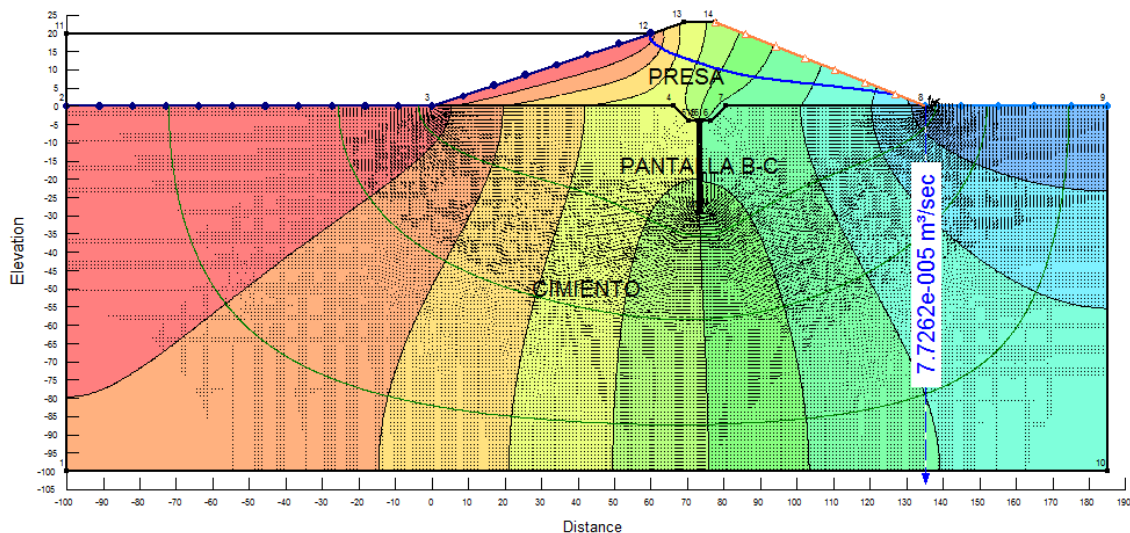
Alternativa 3: Presa con pantalla de hormigón plástico de 80cm de espesor y profundidad de h=19m



Gasto de filtración: $q= 7.94E-02 \text{ l/s}$

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.78

Alternativa 4: Presa con pantalla de hormigón plástico de 80cm de espesor y profundidad de h=25m

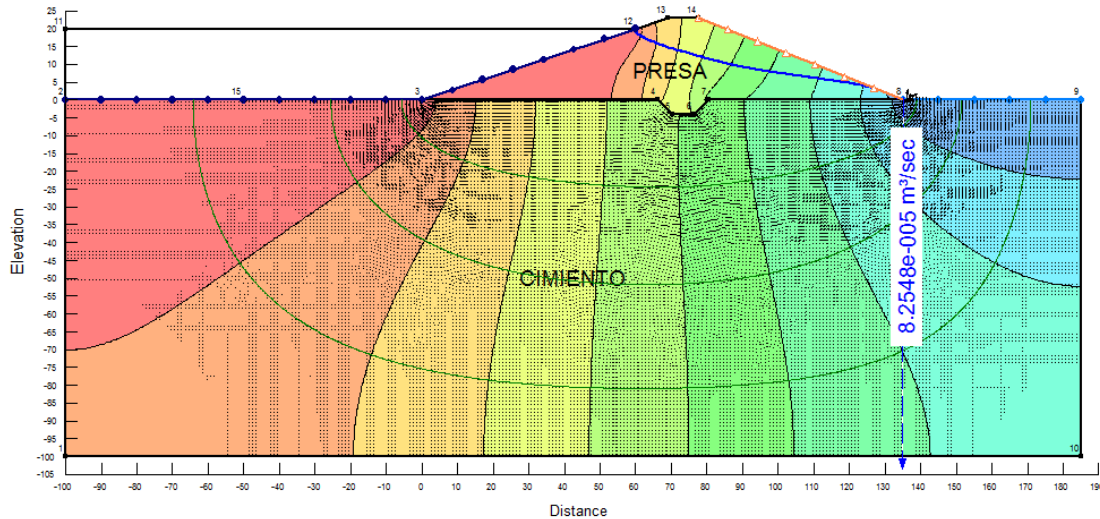


Gasto de filtración: $q= 7.73E-02 \text{ l/s}$

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.69



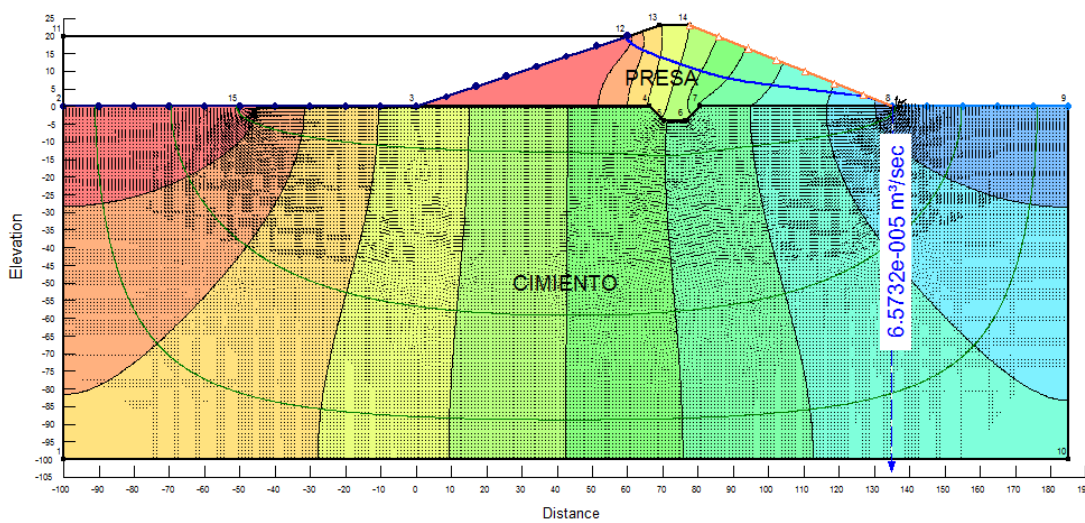
Alternativa 5: Presa con geomembrana hasta L=0m a partir del pie de talud aguas arriba.



Gasto de filtración: $q= 8.25E-02$ l/s

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.92

Alternativo 6: Presa con geomembrana hasta L=50m a partir del pie de talud aguas arriba.

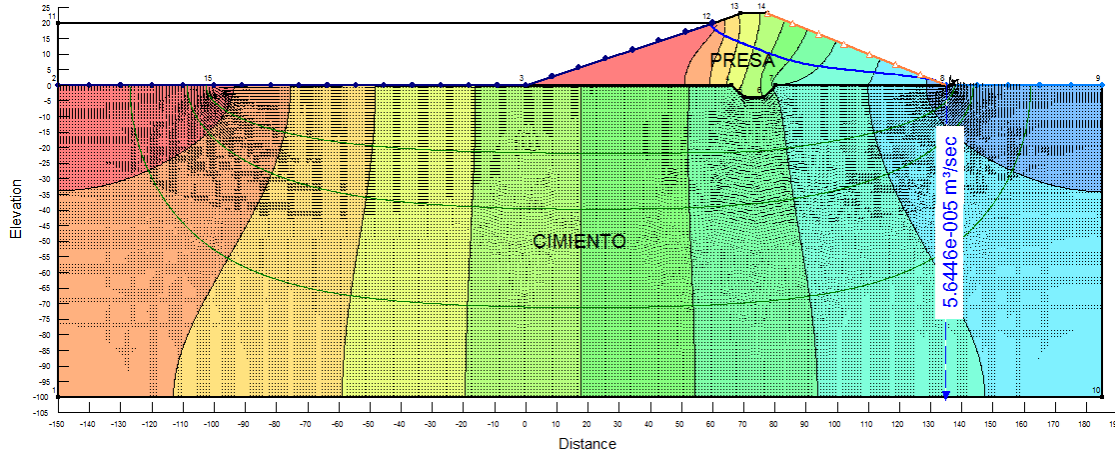


Gasto de filtración: $q= 6.57E-02$ l/s

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.36



Alternativa 7: Presa con geomembrana hasta L=100m a partir del pie de talud aguas arriba.



Gasto de filtración: $q= 5.64E-02 \text{ l/s}$

Gradiente máximo al pie del talud aguas abajo: 1.06.

3.2.RESULTADOS DEL GASTO DE FILTRACIÓN DE LAS PRESAS DEL PROYECTO PACALORI.

Presa	Dentellón de arcilla(l/s)	Pantalla de 12m (l/s)	Pantalla de 19m (l/s)	Pantalla de 25m (l/s)	geomembrana de 0m (l/s)	geomembrana de 50m (l/s)	geomembrana de 100m (l/s)
MACUL1	7.35	7.08	6.78	6.48	7.32	5.53	4.62
MACULLILO	10.03	9.68	9.30	8.90	9.99	7.59	6.37
MOCACHE	11.82	11.44	11.02	10.60	11.79	9.00	7.56
MANGAS SAIBAS	7.89	7.55	7.20	6.87	7.84	5.83	4.40
MACUL 2	9.81	9.43	9.02	8.62	9.80	7.29	6.05
ANGOSTURA	7.54	7.17	6.81	6.46	7.51	5.48	4.36
GARZAS	10.18	9.83	9.45	9.07	10.15	7.74	6.51
CHOJAMPE 2	9.24	8.80	8.31	7.82	9.06	6.60	5.46
CHOJAMPE	8.33	7.91	7.50	7.12	8.30	6.07	5.01
AGUACATAL	16.50	15.81	14.96	14.44	16.39	11.50	9.30
E LECHUGAL	2.47	2.25	2.07	1.93	2.44	1.68	1.36
LECHUGAL2	28.92	28.11	27.26	26.35	28.82	22.37	19.00
PUEBLO VIEJO	20.49	19.57	18.60	17.69	20.45	15.03	12.45

Tabla 3.1 Gasto de filtración de las presas del proyecto PACALORI



En la tabla 3.1 se puede observar los gastos de filtración de cada una de las presas con sus respectivas alternativas contra la filtración, estos gastos fueron sacados mediante la modelación en SEEP/W.

3.3.RESULTADOS DEL GRADIENTE HIDRÁULICO AL PIE DEL TALUD AGUAS ABAJO.

Presa	Solo con dentellón	Pantalla de 12m	Pantalla de 19m	Pantalla de 25m	geomembra na de 0m	geomembra na de 50m	geomembra na de 100m
MACUL1	1.78	1.7	1.61	1.52	1.77	1.22	0.94
MACULLILO	1.94	1.86	1.78	1.69	1.92	1.36	1.06
MOCACHE	1.62	1.53	1.43	1.33	1.61	1.08	0.8
MANGAS SAIBA	1.11	1	0.89	0.79	1.1	0.65	0.46
MACUL 2	1.43	1.33	1.23	1.13	1.42	0.91	0.66
ANGOSTURA	1.11	1	0.89	0.79	1.1	0.65	0.46
GARZAS	1.86	1.77	1.69	1.59	1.85	1.29	1

Tabla 3.2 Gradiente Hidráulico de las presas del trasvase 1

Presa	Solo con dentellon	Pantalla de 12m	Pantalla de 19m	Pantalla de 25m	geomembra na de 0m	geomembra na de 50m	geomembra na de 100m
CHOJAMPE 2	1.24	0.95	0.83	0.73	1.23	0.71	0.48
CHOJAMPE	1	0.89	0.79	0.69	1	0.58	0.385
AGUACATAL	1.32	1.198	1.08	0.97	1.31	0.79	0.56
E LECHUGAL	0.4	0.3	0.255	0.23	0.4	0.22	0.18
LECHUGAL2	1.69	1.61	1.51	1.42	1.68	1.14	0.87
PUEBLO VIEJO	1.19	1.06	0.94	0.84	1.18	0.69	0.48

Tabla 3.3 Gradiente Hidráulico de las presas del transvase 2

Las tablas 3.2 y 3.3 indican los resultados obtenidos de los gradientes hidráulicos máximos a pie de talud aguas abajo, estos resultados son de gran importancia para el análisis de estabilidad de las presas, por el posible arrastre de partículas del suelo a la salida del flujo de filtración, produciendo los fenómenos de sifonamiento mecánico y levantamiento de fondo. En la figura 3.1 se indica la representación gráfica de estas tablas que brinda una mejor interpretación de los resultados.

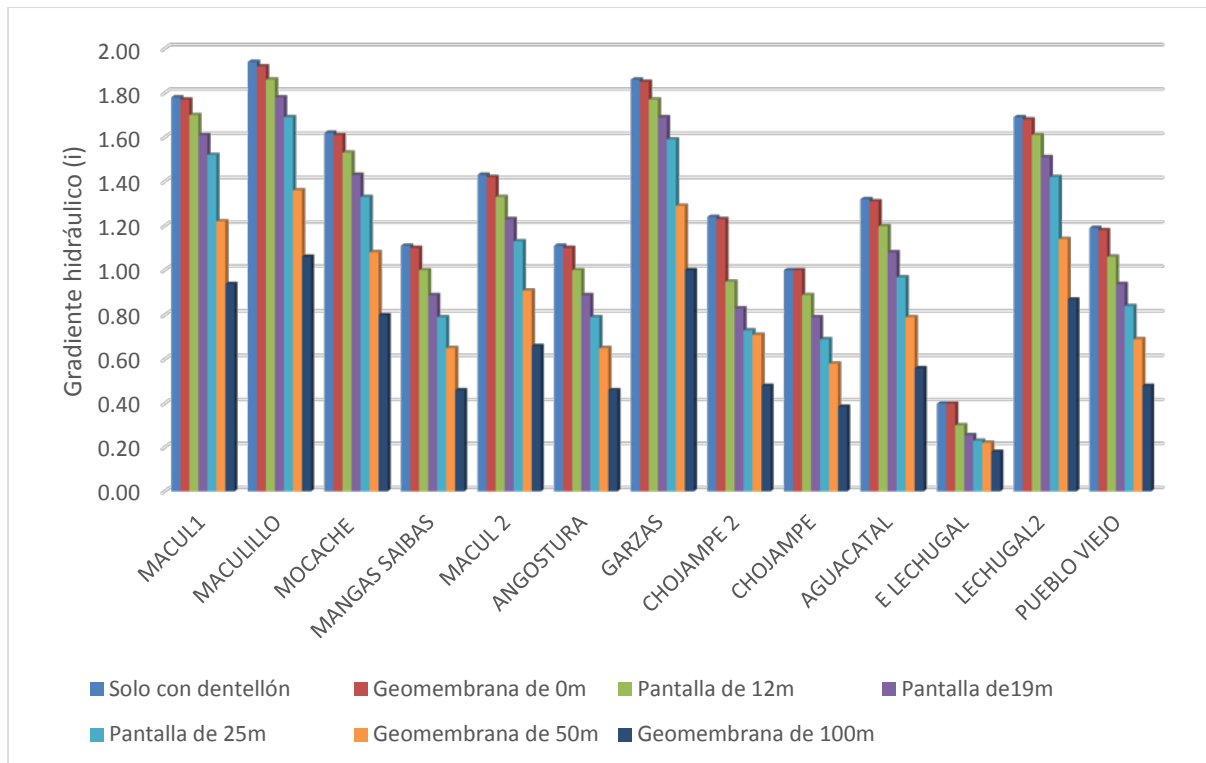


Figura 3.1 Representación gráfica de los resultados para el gradiente hidráulico

3.4. COMPARACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO CON EL GASTO DE FILTRACIÓN.

Presa	Caudal Ecológico (L/s)	Dentellón de arcilla (%)	Pantalla de 12m (%)	Pantalla de 19m (%)	Pantalla de 25m (%)	geomembra na de 0m (%)	geomembra na de 50m (%)	geomembra na de 100m (%)
MACUL1	1360	0.54	0.52	0.50	0.48	0.54	0.41	0.34
MACULLILO	780	1.29	1.24	1.19	1.14	1.28	0.97	0.82
MOCACHE	140	8.45	8.17	7.87	7.57	8.42	6.43	5.40
MANGAS SAIBAS	1060	0.74	0.71	0.68	0.65	0.74	0.55	0.41
MACUL 2	2740	0.36	0.34	0.33	0.31	0.36	0.27	0.22
ANGOSTURA	240	3.14	2.99	2.84	2.69	3.13	2.28	1.82
GARZAS	190	5.36	5.17	4.98	4.77	5.34	4.07	3.42
CHOJAMPE 2	110	8.40	8.00	7.55	7.11	8.24	6.00	4.96
CHOJAMPE	670	1.24	1.18	1.12	1.06	1.24	0.91	0.75
AGUACATAL	130	12.69	12.16	11.51	11.11	12.61	8.84	7.15
E LECHUGAL	230	1.07	0.98	0.90	0.84	1.06	0.73	0.59
LECHUGAL2	630	4.59	4.46	4.33	4.18	4.57	3.55	3.02
PUEBLO VIEJO	210	9.76	9.32	8.86	8.42	9.74	7.16	5.93

Tabla 3.4. Comparación del caudal ecológico y el gasto de filtración.

En la columna del caudal ecológico de la tabla 3.3, se dan los caudales ecológico definidos en la etapa de Factibilidad proporcionados por el PROMAS. En las otras



columnas se dan los porcentajes de los gastos de filtración con respecto al caudal ecológico. Por lo tanto, estos valores nos indican el porcentaje de aportación al caudal ecológico. La figura 3.2 es la representación gráfica del porcentaje de aportación al caudal ecológico para las 13 presas.

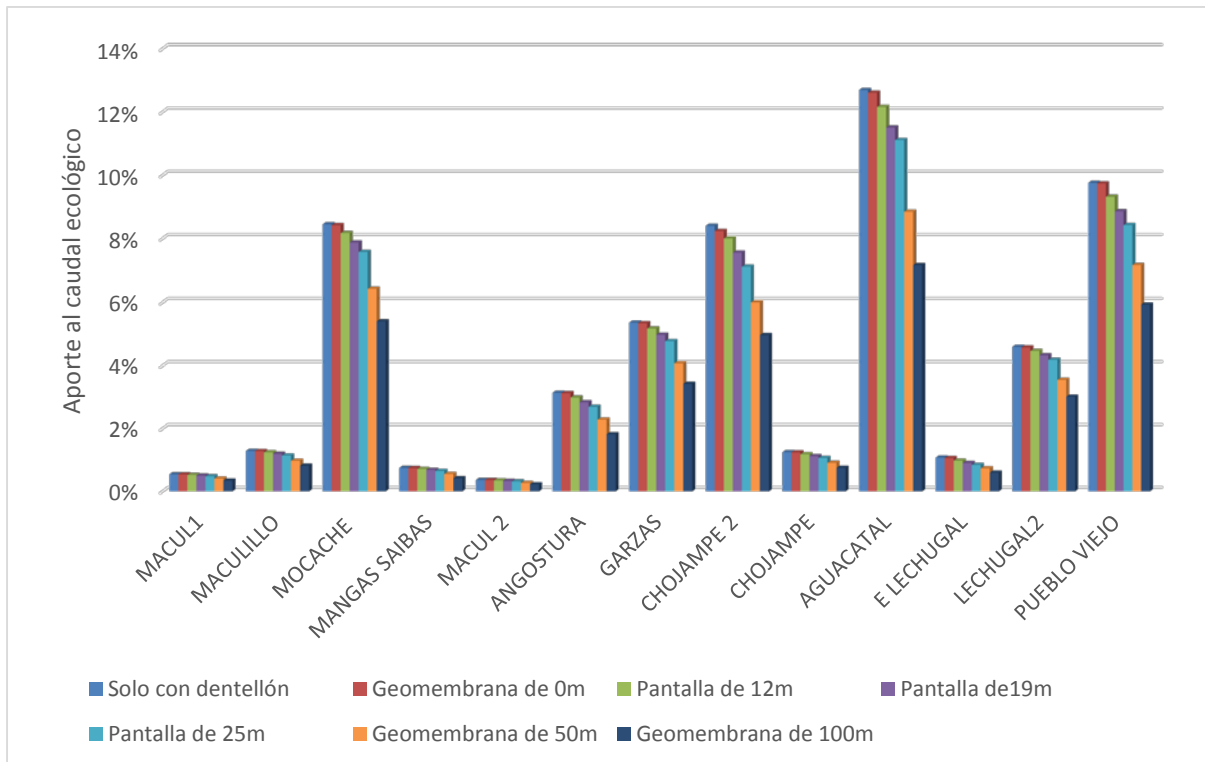


Figura 3.2 Representación gráfica del porcentaje de aportación al caudal ecológico



CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En todas las alternativas el gasto de filtración total, para todas las 13 presas es inferior al gasto ecológico, planteado en las presas del Proyecto PACALORI. La presa de Aguacatal es la que brinda mayor porcentaje de aportación al caudal ecológico, con un 12.69% para la Alternativa 1 en el momento de máximo nivel del embalse. Durante el verano este aporte será menor, ya que desciende el nivel de aguas normales considerado en este cálculo.
2. La reducción del gasto de filtración cuando se utilizan las pantallas colgantes es prácticamente el mismo, con independencia de la profundidad de éstas, ya que para obtener una reducción apreciable del gasto de filtración se requiere pantalla completa, es decir, empotrada en el estrato impermeable, y éste no ha sido encontrado con las perforaciones realizadas en ninguna de las presas investigadas. Esto confirma la experiencia internacional, por lo tanto no se recomienda construir pantallas contra filtración.
3. En las figuras 3.1 y 3.2 se observa que la colocación de la geomembrana por debajo del dentellón y hasta $L=0\text{m}$, Alternativa 5, no indica eficiencia alguna en cuanto a la reducción del gasto por filtración y el gradiente hidráulico.
4. En cuanto a la reducción del gasto de filtración, la colocación de las geomembranas muestra ser más eficiente que las pantallas en sus 3 variantes de profundidad y, aunque no se ha hecho una evaluación económica, todo parece indicar que las geomembranas son menos costosas.
5. Como quiera que en el Proyecto PACALORI no se ha restringido las pérdidas por filtración permisibles y éstas contribuyen al gasto ecológico, aunque en proporción despreciable, concluimos que no se requieren medidas contra filtraciones en las presas analizadas. Aunque no es necesario medidas contra filtración, se plantea la construcción de un dentellón de arcilla, de 6m de ancho y 4m de alto, recomendado por la experiencia internacional en presas



de tierra sobre cimiento no rocoso, para alargar el flujo de filtración y garantizar una mejor unión de la cortina con el cimiento e inspeccionarlos materiales que constituyen las capas superiores del cimiento.

6. Para resolver el posible fallo por sifonamiento en el talud aguas debajo de las presas con dentellón de arcilla se debe colocar filtros para garantizar que no se produzca el mismo.
7. Se recomienda la construcción de un drenaje de pie de talud y una banquetta de drenaje, al pie de talud aguas abajo, con el objetivo de evitar problemas de sifonamiento.
8. Por el valor del gradiente hidráulico admisible en arcillas(1.2), dadas en la Tabla 1.1 se recomienda ser exigente en el diseño de los filtros de las presas Macul 1, Maculillo, Mocache, Macul 2, Garzas, Aguacatal Y Lechugal 2, a fin de evitar sifonamiento mecánico a la salida del flujo de filtración.



REFERENCIAS

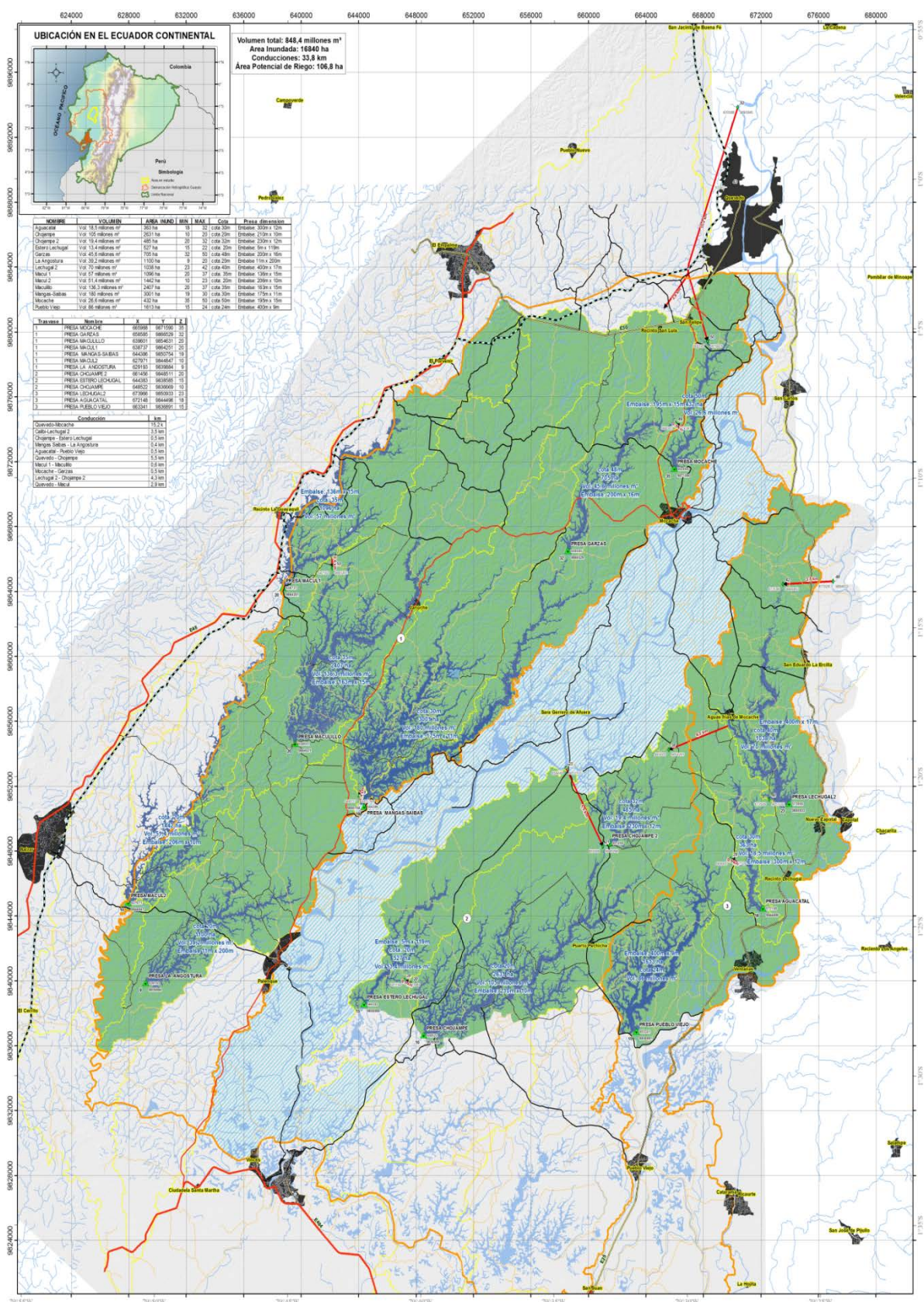
- Armas Novoa, R. & Horta Mestas, E., 1987. Presas de Tierra, Editorial Félix Varela, La Habana Cuba.
- Bathe , K. & Khoshgoftaar , M., 1979. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration. *International Journal for numerical method in Geomechanics*, 3:13–22.
- Beneyto, P., Di Rado, H., Mroginski, J. & Awruch, A., 2005. A model for the analysis of consolidation in unsaturated soils based in state combinations (en español). *Mecánica Computacional*, 24:515–527, 2005.
- Casagrande, A., 1937. Seepage through Dams. *Contributions to Soil Mechanics, 1925 - 1940, Boston Society of Civil Engineers*, 51(2), pp. 295-336.
- Flores Berrones, R., 2000. Flujo de agua a través de suelos. *Avances en Hidráulica. Asociación Mexicana de Hidráulica e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.
- Hantush, M. S., 1962. Flow of ground water in sands of nonuniform thickness ; 3. Flow to wells, *Jour. Geophys. Res.*, vol. 67, no. 4, pp. 1527-1534.
- Harr, M. E., 1962. *Groundwater and Seepage*. McGraw-Hill Book Company, New York. Available from: Technical Information Center, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, P. O. Box 631, Vicksburg, MS 39180-0631.
- Juárez Badillo, E. & Rico Rodríguez, A., 2008. *Mecánica de Suelos, Tomo 3 Flujo de Agua en Suelos* , Editorial Limusa, México.
- Krahn, J., 2012. *Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology*. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Canada.
- Marsal, R. & Resendiz Nuñez, D., 1975. *Presas de Tierra y Enrocamiento*. Victoria Litográfica S. A., Naucalpan, Méjico.
- PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2013. *PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DEL AGUA EN LA PROVINCIA DE LOS RÍOS (Vol. Informe de Prefactibilidad)*.
- PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2014. *PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DEL AGUA EN LA PROVINCIA DE LOS RÍOS (Vol. Informe de Factibilidad, Tomo 3 Climatología, Hidrología y Sedimentología)*.
- PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2014. *PLAN DE APROVECHAMIENTO Y CONTROL DEL AGUA EN LA PROVINCIA DE LOS RÍOS (Vol. Tomo 4 Geología y Geotecnia)*.
- Radhakrishnan, N., 1978. *Flow Nets and Computer Solutions to Seepage Problems, Seminar on Construction Dewatering and Pressure Relief*, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, P. O. Box 631, Vicksburg, MS 39180-0631.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1986. *Seepage Analysis and Control for Dams* , Washington, EM 1110-2-190.



ANEXOS



Anexo 1. Mapa del área del proyecto PACALORI



Fuente: (PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2013)



Anexo 2. Valores de carga hidráulica y longitud de aportación para las secciones centra, margen izquierdo y derecho.

Transvase 1

Presa	L (m)	Lizq (m)	Lder (m)	H (m)	Hizq (m)	Hder (m)
MACUL1	28.66	26.09	76.29	16	6	10
MACULILLO	40	46.5	84.28	20	8	10
MOCACHE	99.56	38.3	51.89	16	9	9
MANGAS SAIBAS	106.44	23.56	26.68	11	6	5
MACUL 2	61.06	93.62	61.18	14	7	7
ANGOSTURA	40.43	56.54	84.11	11	6	7
GARZAS	59.63	49.39	62.34	19	9	8

Transvase 2

Presa	L (m)	Lizq (m)	Lder (m)	H	Hizq	Hder
CHOJAMPE 2	110	61.6	31.11	10	5	5.2
CHOJAMPE	99	40.93	50.47	10	4.5	5.5
AGUACATAL	220	22.37	40.35	12	4.7	6.6
E LECHUGAL	43	33.46	23.35	5	2.2	2.9
LECHUGAL2	330.6	--	83.64	17	--	7.9
PUEBLO VIEJO	290	50	56.6	11	5	3.6



Anexo 3. Resultados de la modelación y el cálculo del gasto por filtración para las secciones central, margen izquierdo y margen derecho.

Resultados para el trasvase 1:

		Solo con dentellon	geomembran a de 0m	geomembran a de 50m	geomembran a de 100m	Pantalla de B- C de 12m	Pantalla de B- C de 19m	Pantalla de B- C de 25m
Presa Macul 1								
Centro	q (l/s/m)	7.85E-02	7.79E-02	6.14E-02	5.24E-02	7.66E-02	7.45E-02	7.24E-02
Margen Der	q (l/s/m)	3.72E-02	3.71E-02	2.65E-02	2.17E-02	3.50E-02	3.28E-02	3.09E-02
Margen Izq	q (l/s/m)	5.41E-02	5.40E-02	4.03E-02	3.35E-02	5.20E-02	4.97E-02	4.72E-02
Gasto por filtración (l/s)		7.35	7.32	5.53	4.62	7.08	6.78	6.48
Presa Maculillo								
Centro	q (l/s)	8.31E-02	8.25E-02	6.57E-02	5.64E-02	8.13E-02	7.94E-02	7.73E-02
Margen Der	q	4.62E-02	4.61E-02	3.37E-02	2.78E-02	4.40E-02	4.17E-02	3.93E-02
Margen Izq	q	5.41E-02	5.40E-02	4.03E-02	3.35E-02	5.20E-02	4.97E-02	4.72E-02
Gasto por filtración (l/s)		10.03	9.99	7.59	6.37	9.68	9.30	8.90
Presa Mocache								
Centro	q (l/s)	7.32E-02	7.30E-02	5.68E-02	4.81E-02	7.13E-02	6.92E-02	6.70E-02
Margen Der	q	5.03E-02	5.01E-02	3.71E-02	3.07E-02	4.81E-02	4.58E-02	4.36E-02
Margen Izq	q	5.03E-02	5.01E-02	3.71E-02	3.07E-02	4.81E-02	4.58E-02	4.36E-02
Gasto por filtración (l/s)		11.82	11.79	9.00	7.56	11.44	11.02	10.60
Presa Mangas Saibas								
Centro	q (l/s)	5.78E-02	5.74E-02	4.32E-02	3.19E-02	5.57E-02	5.34E-02	5.11E-02
Margen Der	q	3.72E-02	3.71E-02	2.65E-02	2.17E-02	3.50E-02	3.28E-02	3.09E-02
Margen Izq	q	3.23E-02	3.21E-02	2.27E-02	1.84E-02	3.00E-02	2.80E-02	2.62E-02
Gasto por filtración (l/s)		7.89	7.84	5.83	4.40	7.55	7.20	6.87
Presa Macul 2								
Centro	q (l/s)	6.74E-02	6.75E-02	5.20E-02	4.35E-02	6.57E-02	6.35E-02	6.13E-02
Margen Der	q	3.68E-02	3.67E-02	2.66E-02	2.19E-02	3.50E-02	3.32E-02	3.15E-02
Margen Izq	q	3.68E-02	3.67E-02	2.66E-02	2.19E-02	3.50E-02	3.32E-02	3.15E-02
Gasto por filtración (l/s)		9.81	9.80	7.29	6.05	9.43	9.02	8.62
Presa Angostura								
Centro	q (l/s)	5.78E-02	5.74E-02	4.32E-02	3.19E-02	5.57E-02	5.34E-02	5.11E-02
Margen Der	q	3.72E-02	3.71E-02	2.65E-02	2.17E-02	3.50E-02	3.28E-02	3.09E-02
Margen Izq	q	3.68E-02	3.67E-02	2.66E-02	2.19E-02	3.50E-02	3.32E-02	3.15E-02
Gasto por filtración (l/s)		7.54	7.51	5.48	4.36	7.17	6.81	6.46
Presa Garzas								
Centro	q (l/s)	8.08E-02	8.05E-02	6.38E-02	5.46E-02	7.90E-02	7.70E-02	7.49E-02
Margen Der	q	5.03E-02	5.01E-02	3.71E-02	3.07E-02	4.81E-02	4.58E-02	4.36E-02
Margen Izq	q	4.62E-02	4.61E-02	3.37E-02	2.78E-02	4.40E-02	4.17E-02	3.93E-02
Gasto por filtración (l/s)		10.18	10.15	7.74	6.51	9.83	9.45	9.07



Resultados para el trasvase 2:

		Solo con dentellon	Pantalla de 12m	Pantalla de 19m	Pantalla de 25m	geomembran a de 0m	geomembran a de 50m	geomembran a de 100m
Presa Chojampe2								
Centro	q (l/s/m)	5.45E-02	5.38E-02	5.12E-02	5.42E-02	4.03E-02	3.37E-02	4.84E-02
Margen Der	q (l/s/m)	3.43E-02	3.18E-02	2.95E-02	3.42E-02	2.39E-02	1.93E-02	2.75E-02
Margen Izq	q (l/s/m)	3.32E-02	3.07E-02	2.85E-02	3.31E-02	2.31E-02	1.87E-02	2.66E-02
Gasto por filtración (l/s)		9.11	8.80	8.31	9.06	6.60	5.46	7.82
Presa Chojampe								
Centro	q (l/s/m)	5.42E-02	5.20E-02	4.97E-02	5.40E-02	4.03E-02	3.35E-02	4.75E-02
Margen Der	q (l/s/m)	3.48E-02	3.25E-02	3.04E-02	3.47E-02	2.46E-02	2.00E-02	2.85E-02
Margen Izq	q (l/s/m)	2.96E-02	2.74E-02	2.55E-02	2.95E-02	2.06E-02	1.67E-02	2.38E-02
Gasto por filtración (l/s)		8.33	7.91	7.50	8.30	6.07	5.01	7.12
Presa Aguacatal								
Centro	q (l/s/m)	6.38E-02	6.14E-02	5.85E-02	6.35E-02	4.45E-02	3.60E-02	5.63E-02
Margen Der	q (l/s/m)	4.27E-02	4.01E-02	3.77E-02	4.19E-02	2.98E-02	2.42E-02	3.54E-02
Margen Izq	q (l/s/m)	3.30E-02	3.04E-02	2.54E-02	3.28E-02	2.26E-02	1.81E-02	2.81E-02
Gasto por filtración (l/s)		16.50	15.81	14.96	16.39	11.50	9.30	14.44
Presa Estero Lechugal								
Centro	q (l/s/m)	3.32E-02	3.07E-02	2.85E-02	3.31E-02	2.31E-02	1.88E-02	2.66E-02
Margen Der	q (l/s/m)	2.10E-02	1.88E-02	1.72E-02	2.00E-02	1.40E-02	1.13E-02	1.59E-02
Margen Izq	q (l/s/m)	1.64E-02	1.46E-02	1.32E-02	1.63E-02	1.08E-02	8.66E-03	1.24E-02
Gasto por filtración (l/s)		2.47	2.25	2.07	2.44	1.68	1.36	1.93
Presa Lechugal 2								
Centro	q (l/s/m)	7.59E-02	7.40E-02	7.20E-02	7.56E-02	5.92E-02	5.05E-02	6.98E-02
Margen Der	q (l/s/m)	4.58E-02	4.36E-02	4.13E-02	4.57E-02	3.34E-02	2.75E-02	3.91E-02
Gasto por filtración (l/s)		28.92	28.11	27.26	28.82	22.37	19.00	26.35
PresaPueblo Viejo								
Centro	q (l/s/m)	6.00E-02	5.77E-02	5.51E-02	5.99E-02	4.45E-02	3.70E-02	5.26E-02
Margen Der	q (l/s/m)	2.53E-02	2.30E-02	2.11E-02	2.51E-02	1.72E-02	1.38E-02	1.95E-02
Margen Izq	q (l/s/m)	3.32E-02	3.07E-02	2.85E-02	3.31E-02	2.31E-02	1.88E-02	2.66E-02
Gasto por filtración (l/s)		20.49	19.57	18.60	20.45	15.03	12.45	17.69