

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**DISEÑO HIDROLÓGICO - HIDRÁULICO PARA PEQUEÑAS  
PRESAS EN CUENCAS NO AFORADAS, USANDO EL MODELO  
DE PRECIPITACIÓN - ESCURRIMIENTO DE TÉMEZ, MEDIANTE  
GEOPROCESAMIENTO SIG Y MODELAMIENTO NUMÉRICO.  
UN ENFOQUE HACIA LA REALIDAD PERUANA:  
CASO VILCANCHOS, AYACUCHO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Andréé Gustavo Hidalgo Ravelo**

**ASESOR: MSc. Ing. Richard Pehovaz Álvarez**

Lima, Diciembre de 2018



*A mi amada familia, por sus constantes  
ánimos y apoyo incondicional. En especial,  
a mis padres, por sus sabios consejos y  
su voluntad inquebrantable.*

# Resumen

El estudio consiste en desarrollar todas las consideraciones hidrológicas e hidráulicas necesarias para proyectar una pequeña presa ( $h < 15$  m.) de materiales sueltos (exceptuando solo laminación de avenidas, rotura de presa y obras conexas), situada en el distrito de Vilcanchos, Ayacucho. La tesis se enfoca en cabeceras de cuenca altoandinas, donde la calibración mediante información hidrométrica no es posible, y se tiene que tener especial precisión en la elección y cálculo del modelo de transformación elegido.

En el **primer capítulo** se define el marco en el que se desarrolla la tesis, haciendo especial énfasis en las limitaciones actuales de la ingeniería hidrológica y el contexto de las pequeñas presas altoandinas en el país.

En el **segundo capítulo** se procede a exponer las bases teóricas sobre las que se constituye la tesis, pasando por recapitular algunos conceptos básicos en ingeniería hidrológica, explicar la estructura y los parámetros descriptores del modelo mensual de transformación precipitación – escurrimiento de Téméz, así como presentar los principales tópicos para el diseño hidráulico y balance hídrico en pequeñas presas de materiales sueltos. Prosiguiendo, se explican los factores que producen los fenómenos de erosión y depositación de sedimentos en embalses, así como las metodologías para su cálculo (USLE). Finalmente, se presentan fundamentos del geoprocesamiento en *sistemas de información geográfica* (GIS) para fines de ingeniería hidrológica, y modelamiento numérico de filtraciones y redes de flujo en presas.

El **tercer capítulo** desarrolla los procedimientos necesarios en las distintas etapas para calcular y dimensionar la presa del caso de estudio. Se comienza con una breve descripción general del proyecto, para luego pasar a la caracterización de la cuenca Champaccocha mediante la definición de las distintas variables en el entorno, sea geomorfometría, geología, edafología, etc., y el análisis geofísico y estratigráfico.

Más adelante, se procede con el procesamiento de datos meteorológicos, lo cual incluye un tratamiento estadístico mediante el *análisis exploratorio de datos* (AED) para descartar *outliers*, y corregir los datos por homogeneidad de la muestra. Continuando con el procedimiento, se ejecuta el completado de datos faltantes, y para finalizar este acápite se hallan las series representativas de precipitación y temperaturas de la cuenca.

Posteriormente, se calcula la evapotranspiración potencial y se procede a simular el modelo de Téméz. Una vez llegado a este punto, se inicia con el modelado BIM de la presa, con lo cual luego es posible ejecutar los apartados de cálculo de volumen muerto y modelamiento numérico bidimensional de redes de flujo con SEEP/W de Geostudio.

Terminando el capítulo, se calculan los caudales ecológicos, se ejecuta el balance hídrico en la presa, y se analiza el nivel de impacto que genera el represamiento en la satisfacción de la demanda agrícola mediante un análisis de sensibilidad variando la cantidad de parcelas regadas y la altura de la presa. Por último, se realiza un pequeño acápite de vulnerabilidad ante el cambio climático, en el cual se evalúan las proyecciones hacia el año 2030.

En el **capítulo final**, se plasman las principales reflexiones y conclusiones respecto al desarrollo de la tesis, así como recomendaciones que apoyan el desarrollo de futuras investigaciones en este amplio campo de estudio.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Diseño hidrológico - hidráulico para pequeñas presas en cuencas no aforadas, usando el modelo de precipitación - escurrimiento de Témez, mediante geoprocesamiento SIG y modelamiento numérico. Un enfoque hacia la realidad peruana: Caso Vilcanchos, Ayacucho

Área : Medio Ambiente y Recursos Hídricos

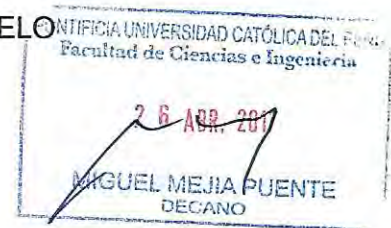
Asesor : MSc. Ing. Richard Pehovaz Álvarez

Alumno : ANDREÉ GUSTAVO HIDALGO RAVELO

Código : 2006.1069.412

Tema N° : # 88

Fecha : Lima, 17 de abril del 2017



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La etapa de incertidumbre más variable en cualquier proyecto hidráulico es la hidrología. En nuestro país se cuenta con muy pocas estaciones hidrológicas y meteorológicas desde las cuales se puede obtener información vital para el desarrollo de los proyectos de ingeniería relacionados a la hidráulica.

Sin embargo, son aún menos las estaciones hidrométricas con las que se cuenta, repercutiendo directamente en la falta de calibración de los modelos de simulación hidrológica continua, representando en ocasiones, comportamientos erróneos de la cuenca analizada. Es entonces, precisamente en el contexto de las cuencas no aforadas, en donde cobra especial importancia la calidad del modelo elegido, así como la precisión de las herramientas utilizadas para su cálculo.

Por otro lado, en la actualidad, en el ámbito de la ingeniería hidráulica nacional, no se cuenta con un modelo de simulación hidrológica continua que haya alcanzado un nivel de consenso suficientemente alto para que pueda ser dispuesto como la directriz oficial que determine el proceder en una infinidad de proyectos hidráulicos. Debido a ello, no es posible concentrar los esfuerzos de los ingenieros, para el calibrado de los parámetros intrínsecos en las distintas zonas del país, que conlleve a la creación de mapas zonales que permitan estandarizar los resultados, tales como los que ya se han generado en otros países latinoamericanos.

Por otro lado, a pesar que las herramientas informáticas tanto para la determinación de parámetros hidrológicos, como para los cálculos de ingeniería, sumamente imprescindibles para el modelamiento hidrológico e hidráulico, han avanzado de forma importante en los últimos años, existen aún ingenieros en el medio que no conocen a profundidad, la complejidad y precisión que ofrecen las herramientas de los softwares actuales.

OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo principal de esta tesis se centra en exponer y validar el modelo y herramientas informáticas, que a criterio presentan la mayor versatilidad al momento de potenciar y optimizar la simulación hidrológica continua, en el marco del modelamiento hidráulico de pequeñas presas, para lo cual, en el estudio de caso elegido, se diseñará una presa de

tierra con fines de abastecimiento para el riego de parcelas agrícolas, ubicada en el distrito de Vilcanchos, Ayacucho.

En primer lugar, se desarrolla la aplicación del modelo de volumen mensual precipitación – escorrentía de Téméz, modelo de amplia difusión y aceptación a nivel internacional, por su versatilidad de aplicación y nivel aceptable de simplicidad esquemática de parámetros descriptores, hacia el cual se han alineado de forma oficial países referentes como España, Uruguay, entre otros, adoptándolo como modelo oficial para generación de caudales mensuales para el modelamiento hídrico, con especial énfasis para el diseño de pequeñas presas en cuencas no aforadas, donde por la magnitud y menor complejidad de la estructura, es aceptable y necesaria una estandarización del procedimiento de ingeniería a realizar.

En segundo lugar, se exponen las bondades tecnológicas de varios de los softwares más actuales con aplicaciones para la ingeniería hidrológica e hidráulica, demostrando su mayor exactitud y precisión en la aplicación de la gran combinación de las fórmulas de ingeniería con los métodos computacionales modernos.

El alcance del estudio solo incluye el modelamiento hidrológico – hidráulico de una pequeña presa de tierra, por lo que se asumirán dimensiones y parámetros que normalmente deberían definirse en la interacción con la especialidad geotécnica del estudio.

#### METODOLOGÍA Y RESULTADOS ESPERADOS

Se desarrollarán procedimientos habituales en el modelamiento hidrológico continuo, pasando por el tratamiento estadístico previo y completamiento de datos, procesamiento topográfico, cálculo de parámetros morfométricos, etc., así como el desarrollo del modelo de Téméz y el balance hídrico en el embalse.

Otros procesos intermedios importantes como el análisis de filtraciones y el cálculo del volumen de sedimentos también se desarrollarán convenientemente, adicionalmente también se utilizará soporte geofísico.

Estos procedimientos serán calculados desde los módulos especializados de varios de los paquetes de software de ingeniería hidráulica más adecuados y difundidos en la actualidad, tales como sistemas de información geográfica, programas de modelamiento numérico, software BIM, algoritmos de predicción, entre muchos otros.

Como producto final, se presentará el diseño de una presa de tierra y el hidrograma de oferta anual para la satisfacción de la demanda de riego.

En base a los resultados, se comentarán las ventajas del procedimiento utilizado, en un esfuerzo por medir la versatilidad del modelo de Téméz en el ámbito peruano, y la precisión de varias de las herramientas computacionales más relevantes en la actualidad para el soporte del modelamiento hidrológico – hidráulico, enfocado al diseño de pequeñas presas.

NOTA  
Extensión máxima: 100 páginas


# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	Marco social y de ingeniería en el país .....	1
1.1.1	Limitaciones actuales en ingeniería hidrológica .....	1
1.1.2	Pequeñas presas en el Perú.....	1
1.2	Objetivos, alcances y visión de la tesis .....	2
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1	Tópicos de ingeniería de recursos hídricos .....	4
2.2	Modelo mensual de transformación precipitación - escurrimiento .....	7
2.2.1	Estructura del modelo de Téméz.....	8
2.2.2	Descripción de parámetros del modelo .....	12
2.3	Ingeniería de pequeñas presas.....	14
2.3.1	Diseño de presas de materiales sueltos .....	14
2.3.2	Balance hídrico en reservorios .....	20
2.4	Sedimentología en embalses .....	23
2.4.1	Introducción al fenómeno de la erosión .....	23
2.4.2	Modelo USLE .....	26
2.4.3	Volumen muerto de embalses .....	32
2.5	Fundamentos de software de ingeniería.....	34
2.5.1	Sistemas de Información Geográfica en hidrología .....	34
2.5.2	Modelamiento numérico de filtraciones en presas.....	37
<b>3</b>	<b>CASO DE ESTUDIO: PROYECTO PRESA CHAMPACCOCHA.....</b>	<b>39</b>
3.1	Descripción general del proyecto.....	39
3.2	Caracterización de la cuenca.....	41
3.2.1	Parámetros morfométricos .....	41
3.2.2	Bio-climatología, hidrografía y geología .....	44
3.2.3	Análisis geofísico y estratigráfico.....	50
3.3	Procesamiento estadístico de datos .....	54

3.3.1	Selección de estaciones meteorológicas.....	54
3.3.2	Análisis Exploratorio de Datos (AED) .....	57
3.3.3	Extensión de series hidrológicas .....	61
3.3.4	Integración espacial de variables .....	64
3.4	Estimación del volumen de escurrimiento .....	66
3.4.1	Cálculo de la evapotranspiración potencial.....	66
3.4.2	Determinación de parámetros del modelo de Témez.....	68
3.4.3	Generación de caudales sintéticos.....	69
3.5	Dimensionado del volumen de embalse.....	71
3.5.1	Modelado BIM de la represa.....	71
3.5.2	Curva de capacidad del embalse .....	74
3.6	Evaluación de sedimentos en el embalse .....	76
3.6.1	Cálculo de la erosión en la cuenca .....	76
3.6.2	Determinación del volumen muerto.....	79
3.7	Análisis de filtraciones.....	81
3.7.1	Modelo conceptual hidrogeológico.....	81
3.7.2	Modelamiento numérico bidimensional de redes de flujo .....	83
3.8	Simulación de operación del reservorio.....	86
3.8.1	Determinación del caudal ecológico .....	86
3.8.2	Balance hídrico mensual en el embalse .....	88
3.8.3	Análisis de satisfacción de la demanda .....	91
3.9	Vulnerabilidad ante el cambio climático.....	93
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....</b>	<b>94</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>97</b>

## **ANEXOS**

- I. Apéndices auxiliares
- II. Gráficos totales
- III. Mapas nacionales
- IV. Memorias de cálculo

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1-1</b>	Curva generalizada del coeficiente de cultivo .....	4
<b>Figura 2.1-2</b>	Evapotranspiración de referencia de un cultivo, bajo condiciones estándar y no estándar.....	4
<b>Figura 2.1-3</b>	Relación de los constituyentes de suelo por tamaño .....	6
<b>Figura 2.2-1</b>	La cuenca como un sistema hidrológico .....	7
<b>Figura 2.2-2</b>	Esquematización de la influencia de bombeos intensivos y continuos en la modificación de la superficie freática.....	8
<b>Figura 2.2-3</b>	Comparación de los registros de la humedad del suelo a partir de simulaciones con dos condiciones iniciales distintas .....	8
<b>Figura 2.2-4</b>	Esquema de entradas y salidas en el Modelo de Témex .....	9
<b>Figura 2.2-5</b>	Sistema de flujos y almacenamiento del Modelo de Témex .....	9
<b>Figura 2.2-6</b>	Ley de excedentes .....	10
<b>Figura 2.2-7</b>	Ecuación que relaciona la infiltración con el excedente existente .....	10
<b>Figura 2.3-1</b>	Componentes del volumen de almacenamiento de un reservorio .....	15
<b>Figura 2.3-2</b>	Ejemplo de presa de escollera con núcleo RMA .....	15
<b>Figura 2.3-3</b>	Presa zonificada con zanja de impermeabilización total.....	16
<b>Figura 2.3-4</b>	Proporción de núcleos impermeables en presas de tierra .....	18
<b>Figura 2.3-5</b>	Determinación del Fetch máximo.....	19
<b>Figura 2.3-6</b>	Elementos del balance hídrico en el reservorio .....	20
<b>Figura 2.4-1</b>	Formación del suelo a través de la intemperización .....	23
<b>Figura 2.4-2</b>	Proceso de erosión .....	24
<b>Figura 2.4-3</b>	Relación entre producción de sedimentos y precipitación anual .....	24
<b>Figura 2.4-4</b>	Mapa de velocidad media anual del viento .....	25
<b>Figura 2.4-5</b>	Nomograma para calcular la erodabilidad del suelo K.....	27
<b>Figura 2.4-6</b>	Ciclos estacionales de lluvia, cobertura vegetal y erosión .....	29
<b>Figura 2.4-7</b>	Variaciones en las tasas de erosión y depositación.....	30
<b>Figura 2.4-8</b>	Representación esquemática de cuatro tipos de terraza .....	30
<b>Figura 2.4-9</b>	Variación del coeficiente de entrega de sedimentos.....	31
<b>Figura 2.4-10</b>	Esquemas básicos del depósito de sedimentos en embalses .....	33
<b>Figura 2.5-1</b>	Concepto de capa de información geográfica dentro de un GIS .....	34
<b>Figura 2.5-2</b>	Extensión de la fórmula de la USLE para combinación GIS.....	34
<b>Figura 2.5-3</b>	Representación vectorial vs ráster .....	34
<b>Figura 2.5-4</b>	Procesos de acumulación según valores de curvaturas.....	34
<b>Figura 2.5-5</b>	Función de asignación de dirección de flujo. ....	35
<b>Figura 2.5-6</b>	Propagación de errores de dirección en el modelo D8 .....	35

<b>Figura 2.5-7</b> El área acumulada de una cuenca con el Modelo D8.....	36
<b>Figura 2.5-8</b> División de una cuenca en múltiples subcuencas.....	36
<b>Figura 2.5-9</b> Red de flujo por debajo de una presa de concreto .....	37
<b>Figura 2.5-10</b> Conceptualización del esquema numérico hidrogeológico para flujo a través de presas zonificadas de materiales sueltos .....	38
<b>Figura 3.1-1</b> Ubicación geográfica de la cuenca Champacocha .....	39
<b>Figura 3.1-2</b> Cuadrángulo de Paras, hoja 28n-I de la carta geológica nacional.....	39
<b>Figura 3.1-3</b> Proyecto en GIS del sistema de abastecimiento de riego .....	40
<b>Figura 3.2-1</b> Algoritmo unificado de Arc Hydro Tools creado en Model Builder .....	41
<b>Figura 3.2-2</b> Mapas generados desde Arc Hydro Tools .....	42
<b>Figura 3.2-3</b> MDE de la microcuenca .....	42
<b>Figura 3.2-4</b> Visualización pseudo 3D de la microcuenca en QGIS.....	42
<b>Figura 3.2-5</b> Clasificación por rango de elevaciones de la cuenca .....	43
<b>Figura 3.2-6</b> Ubicación de Cuenca Champacocha respecto de las grandes cuencas hidrográficas regionales .....	44
<b>Figura 3.2-7</b> Mapas nacionales de variables para caracterizar cuenca .....	45
<b>Figura 3.2-8</b> Distribución referencial de la geología regional en los alrededores de la cuenca de estudio .....	46
<b>Figura 3.2-9</b> Distribución geológica superficial en la cuenca Champacocha .....	46
<b>Figura 3.2-10</b> Perfil típico geo-sísmico de la zona del vaso del embalse.....	50
<b>Figura 3.2-11</b> Ubicación de las cuatro calicatas obtenidas .....	52
<b>Figura 3.2-12</b> Ficha descriptiva de perfil estratigráfico típico .....	53
<b>Figura 3.3-1</b> Ubicación geográfica de las 5 estaciones meteorológicas.....	55
<b>Figura 3.3-2</b> Mapas de variación espacial de Pp, T <sub>máx</sub> y T <sub>min</sub> .....	55
<b>Figura 3.3-3</b> Discretización regional en el área de actuación de las estaciones seleccionadas de la variación espacial de Pp, T <sub>máx</sub> , y T <sub>min</sub> .....	56
<b>Figura 3.3-4</b> Cronograma inicial de Pp de las cinco estaciones analizadas .....	57
<b>Figura 3.3-5</b> Histogramas de Pp y T <sub>med</sub> .....	58
<b>Figura 3.3-6</b> Box Plot de la precipitación mensual promedio .....	58
<b>Figura 3.3-7</b> Vista de calendario por año hidrológico .....	59
<b>Figura 3.3-8</b> Series de tiempo de Pp luego del completado por doble masa .....	62
<b>Figura 3.3-9</b> Configuración de la regresión en Hydrognomon para Pp.....	62
<b>Figura 3.3-10</b> Configuración de la regresión en Hydrognomon para T <sub>min</sub> .....	62
<b>Figura 3.3-11</b> Cronograma inicial de T <sub>min</sub> en CHAC .....	62
<b>Figura 3.3-12</b> Cuadro de integración espacial de la precipitación superficial .....	64
<b>Figura 3.4-1</b> Ubicación de lagunas actuales dentro de la cuenca .....	67
<b>Figura 3.4-2</b> Configuración de las opciones de ETP en Hydrognomon .....	67

<b>Figura 3.5-1</b>	Alineamiento en planta de futura represa en Civil 3D .....	71
<b>Figura 3.5-2</b>	Perfil topográfico de presa artesanal actual en Civil 3D .....	73
<b>Figura 3.5-3</b>	Secciones de excavación en zona ladera y represa .....	73
<b>Figura 3.5-4</b>	Perfiles longitudinales de excavación y corona de represa .....	74
<b>Figura 3.5-5</b>	Visualización 3D de terreno con la presa .....	74
<b>Figura 3.5-6</b>	Clasificación por elevaciones del vaso de la represa .....	74
<b>Figura 3.6-1</b>	Vista del aplicativo que muestra el aumento de la velocidad media del viento con la altura .....	76
<b>Figura 3.6-2</b>	Curvas IDF Champacocha por método IILA-SENAMHI-UNI .....	77
<b>Figura 3.6-3</b>	Mapa de pendientes por rangos en la cuenca .....	78
<b>Figura 3.6-4</b>	Mapas parciales USLE .....	78
<b>Figura 3.6-5</b>	Mapa final USLE de la cuenca .....	79
<b>Figura 3.7-1</b>	Rangos típicos de conductividad hidráulica en suelos y rocas .....	82
<b>Figura 3.7-2</b>	Distribución de materiales constituyentes del modelo .....	83
<b>Figura 3.7-3</b>	Funciones de contenido volumétrico y conductividad hidráulica vs succión de poros, correspondientes a la arcilla y la arena limosa .....	83
<b>Figura 3.7-4</b>	Condiciones de contorno definidas en el modelo .....	84
<b>Figura 3.7-5</b>	Distribución de la discretización por tamaño de malla .....	84
<b>Figura 3.7-6</b>	Resultados de SEEP/W .....	85
<b>Figura 3.7-7</b>	Simulación en SEEP/W de los patrones de flujo dentro de la presa... ..	85
<b>Figura 3.8-1</b>	Representación de la distribución de Weibull .....	86
<b>Figura 3.8-2</b>	Ajuste de funciones probabilísticas de la geometría del embalse .....	89
<b>Figura 3.8-3</b>	Dimensiones y niveles finales de la represa Champacocha .....	92
<b>Figura 3.9-1</b>	Mapas de proyecciones 2030 de variaciones de Pp, Tmáx y Tmin ....	93

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.1-1</b>	Inventario de presas en el Perú por finalidad o uso .....	1
<b>Cuadro 2.1-1</b>	Coeficiente Kc para pastos y cuerpos de agua superficial .....	5
<b>Cuadro 2.2-1</b>	Valores calibrados de los parámetros del modelo de Témez .....	12
<b>Cuadro 2.2-2</b>	Rangos de los parámetros del modelo de Témez .....	12
<b>Cuadro 2.2-3</b>	Valores referenciales de Hmáx .....	13
<b>Cuadro 2.2-4</b>	Valores aproximados de Imáx .....	13
<b>Cuadro 2.3-1</b>	Taludes y materiales recomendados para presas de tierra .....	18
<b>Cuadro 2.3-2</b>	Espesor y granulometría recomendados para la escollera .....	18
<b>Cuadro 2.3-3</b>	Borde libre según Fetch .....	19

<b>Cuadro 2.4-1</b> Escala de Beaufort de la velocidad de los vientos .....	25
<b>Cuadro 2.4-2</b> Magnitud general del factor K .....	28
<b>Cuadro 2.4-3</b> Valores de cobertura vegetal .....	29
<b>Cuadro 2.4-4</b> Valores del Factor LS para diferentes pendientes .....	30
<b>Cuadro 2.4-5</b> Escala de pérdida de suelo .....	30
<b>Cuadro 2.4-6</b> Pesos específicos iniciales y factores de compactación del sedimento para el criterio de Miller .....	33
<b>Cuadro 3.2-1</b> Descripción y clasificación de capas geológicas en la carta 28n-I ....	47
<b>Cuadro 3.2-2</b> Tabla de clasificación de rocas ígneas .....	48
<b>Cuadro 3.2-3</b> Valores promedios de Vp .....	51
<b>Cuadro 3.3-1</b> Resumen de información meteorológica histórica .....	54
<b>Cuadro 3.8-1</b> Extracto de metodología de para determinar caudales ecológicos ...	86

## Índice de Tablas

<b>Tabla 3.2-1</b> Parámetros morfométricos de la cuenca Champaccocha .....	43
<b>Tabla 3.2-2</b> Resumen de parámetros de estratos según geofísica .....	51
<b>Tabla 3.2-3</b> Clases texturales desde las calicatas y tabla FAO .....	54
<b>Tabla 3.2-4</b> Resumen de propiedades y descripciones de la estratigrafía .....	54
<b>Tabla 3.3-1</b> Valoración de la fiabilidad de la medición de las estaciones .....	60
<b>Tabla 3.3-2</b> Comparación de resultados de temperatura con valores regionales....	66
<b>Tabla 3.4-1</b> Comparación de resultados de ETP con valores regionales .....	68
<b>Tabla 3.4-2</b> Cálculo ponderado del H <sub>máx</sub> de la cuenca .....	68
<b>Tabla 3.4-3</b> Cálculo ponderado del I <sub>máx</sub> de la cuenca .....	69
<b>Tabla 3.4-4</b> Extracto de planilla de cálculo del escurrimiento .....	70
<b>Tabla 3.5-1</b> Profundidades máximas de los estratos existentes .....	72
<b>Tabla 3.6-1</b> Resumen del cálculo del factor K de cada estrato superficial .....	77
<b>Tabla 3.6-2</b> Valores del factor C en la cuenca .....	78
<b>Tabla 3.6-3</b> Cálculo de $\delta\sigma$ y K ponderados .....	80
<b>Tabla 3.7-1</b> Conductividades hidráulicas y porosidades en estratos modelados ....	82
<b>Tabla 3.8-1</b> Aplicación de prueba de Kolmogorov – Smirnov .....	87
<b>Tabla 3.8-2</b> Predicción del caudal al 95% de excedencia .....	87
<b>Tabla 3.8-3</b> Parámetros de ecuaciones de la geometría del vaso .....	89
<b>Tabla 3.8-4</b> Extracto de planilla de la simulación del balance hídrico .....	90
<b>Tabla 3.8-5</b> ISD bajo diferentes configuraciones .....	92

## Índice de Gráficos

<b>Gráfico 3.2-1</b> Curva hipsométrica de la cuenca Champacocha .....	43
<b>Gráfico 3.3-1</b> CDM de La Quinoa vs Huancapi, original y homogeneizada .....	60
<b>Gráfico 3.3-2</b> Histogramas completados de estación Túnel Cerro de Pp y Tmin.....	63
<b>Gráfico 3.3-3</b> Histograma de la cuenca Champacocha de Pmed y Tmed .....	65
<b>Gráfico 3.4-1</b> Histograma de Evapotranspiración Potencial .....	67
<b>Gráfico 3.4-2</b> Comparación entre precipitación y escurrimiento .....	70
<b>Gráfico 3.4-3</b> Proporción del escurrimiento por épocas del año .....	71
<b>Gráfico 3.5-1</b> Curva de capacidad bruta del embalse .....	75
<b>Gráfico 3.5-2</b> Volumen del embalse por debajo del borde libre .....	75
<b>Gráfico 3.6-1</b> Cota teórica de volumen muerto por colmatación .....	80
<b>Gráfico 3.6-2</b> Curva de capacidad efectiva o útil del embalse .....	81
<b>Gráfico 3.8-1</b> Comparación de caudales ecológicos vs escorrentía .....	88
<b>Gráfico 3.8-2</b> Demanda unitaria estacional agrológica .....	88
<b>Gráfico 3.8-3</b> Resultados de la simulación a nivel mensual.....	90
<b>Gráfico 3.8-4</b> Sensibilidad del ISD de acuerdo a la variación de Hv y Ar .....	91

## Índice de Imágenes

<b>Imagen 3.1-1</b> Punto de cierre de la Cuenca Champacocha .....	40
<b>Imagen 3.1-2</b> Represamiento rudimentario actual .....	40
<b>Imagen 3.2-1</b> Imagen satelital de la cuenca Champacocha .....	49
<b>Imagen 3.2-2</b> Foto referencial del “césped de puna” .....	49

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 2.2-1</b> Fórmula para cálculo de $\alpha$ en Puna .....	14
<b>Ecuación 2.3-1</b> Anchura menor de zanja .....	17
<b>Ecuación 2.3-2</b> Ancho de corona .....	17
<b>Ecuación 2.4-1</b> Fórmula de Morgan .....	26
<b>Ecuación 2.4-2</b> Fórmula de Van Dijk .....	27
<b>Ecuación 2.4-3</b> Fórmula de Brown .....	32
<b>Ecuación 2.4-4</b> Fórmula de Miller.....	33

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 MARCO SOCIAL Y DE INGENIERÍA EN EL PAÍS

### 1.1.1 LIMITACIONES ACTUALES EN INGENIERÍA HIDROLÓGICA

En un proyecto hidráulico la etapa con más incertidumbre es la hidrología. La cantidad de estaciones meteorológicas o hidrométricas disponibles en nuestro país es muy escasa, a pesar de ser sumamente necesarias para desarrollar ingeniería hidrológica básica. Esta situación induce a modelaciones erróneas del comportamiento de las cuencas analizadas, debido a la falta de calibración de los modelos de simulación continua. En este contexto de cuencas no aforadas, es donde surge la necesidad de escoger un modelo idóneo, así como de mejorar la precisión de las herramientas de ingeniería utilizadas para su cálculo.

En años recientes, diversas instituciones del estado han realizado publicaciones de mapas oficiales de gran valor ingenieril, lo cual sugiere un avance importante al momento de caracterizar cuencas, sin embargo, estos adelantos no están esquematizados y plasmados en una guía de actualización de procedimientos y fuentes de información.

Por otro lado, en el ámbito actual de la ingeniería hidráulica nacional no se cuenta con un nivel de consenso suficientemente alto sobre un modelo de simulación hidrológica continua, para que este pueda ser dispuesto como la directriz oficial que determine el proceder en una infinidad de proyectos de disponibilidad hídrica. En este contexto, no es posible concentrar esfuerzos para el calibrado de los parámetros descriptores en las distintas zonas del país, que conlleve a la creación de mapas regionales que permitan estandarizar los resultados, tales como los que ya se han generado en otros países iberoamericanos como Uruguay o España.

### 1.1.2 PEQUEÑAS PRESAS EN EL PERÚ

N°	Finalidad(es) o uso(s) del embalse	N° de presas
1	Riego	442
2	Riego / Aprovechamiento hidroenergético	61
3	Aprovechamiento hidroenergético	31
4	Riego / Suministro de agua	24
5	Minería	11
6	Suministro de agua	10
7	Riego / Suministro de agua / Aprovechamiento hidroenergético	7
8	Suministro de agua / Minería	5
9	Aprovechamiento hidroenergético / Suministro de agua	5
10	Riego / Suministro de agua / Industrial	4
11	Riego / Aprovechamiento hidroenergético / Otros usos	3
12	Riego / Piscícola	3
13	Suministro de agua / Industrial	2
14	Riego / Suministro de agua / Aprovechamiento hidroenergético / Otros usos	2
15	Riego / Minería	2
16	Aprovechamiento hidroenergético / Piscícola	2
17	Suministro de agua / Ganadero	1
18	Riego / Suministro de agua / Piscícola	1
19	Riego / Ganadero	1
20	Minería / Control de avenidas	1
21	Minería / Relaves	113
22	Varios	12
<b>Total</b>		<b>743</b>

Cuadro 1.1-1 Inventario de presas en el Perú por finalidad o uso (ANA, 2015)

La principal finalidad de uso de las presas en el Perú (cuadro 1.1-1) es con fines de riego (442 de 743 presas), por lo que, en la actualidad, instituciones del estado como el *Proyecto Subsectorial de Irrigaciones* (PSI) o el MINAGRI, gestionan múltiples proyectos sociales de ayuda para la tecnificación del riego de parcelas agrarias. Los cientos de proyectos de pequeñas presas que se requieren y se desean poner en marcha para apoyar al sector agro, se encuentran en su gran mayoría en el ámbito altoandino del país. Este escenario supone modelar la capacidad hídrica del embalse en cabeceras de cuenca, donde no existe aforo de caudales.

Por otro lado, desde que ha cobrado relevancia el problema de sedimentación en embalses, se han desarrollado múltiples métodos para la remoción de sedimentos (como el *flushing*), sin embargo, las alternativas convencionales no alcanzan altos grados de eficiencia. En el Perú, el *Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria* (IHHS) de la Universidad de Piura, ha instalado un sistema de hidrosucción en el embalse Cirato de la central hidroeléctrica de Carhuaquero, el cual se encuentra en la actualidad en funcionamiento.

No obstante, si bien este tipo de técnicas avanzadas<sup>1</sup> da buenos resultados, solo se justifica su uso en grandes proyectos, por lo que su aplicación queda fuera del alcance de las pequeñas presas, ya que el nivel de impacto que representan no es comparable al de una obra principal.

## **1.2 OBJETIVOS, ALCANCES Y VISIÓN DE LA TESIS**

### **Objetivos del estudio**

La principal finalidad de esta tesis es la optimización del cálculo de abastecimiento hídrico de una pequeña presa de materiales sueltos emplazada en una cabecera de cuenca altoandina.

Los principales lineamientos sobre los que se desarrolla el documento son los siguientes:

- En primer lugar, se exhiben las principales novedades en cuanto a fuentes de información oficial publicadas desde instituciones gubernamentales en los años recientes, y su aplicación en la caracterización a nivel edafológico, geomorfológico, etc. de la cuenca de estudio, demostrando el alto valor científico y de ingeniería que ostentan en la actualidad.
- En segundo lugar, se analiza la versatilidad en el ámbito peruano del modelo de volumen mensual de transformación precipitación – escorrentía de Témez, modelo de amplia difusión y aceptación a nivel internacional, por su nivel adecuado de simplicidad esquemática de parámetros descriptores, hacia el cual se han alineado países referentes como España, Portugal, Uruguay, entre otros, adoptándolo como modelo oficial para la generación de caudales mensuales para el abastecimiento hídrico, con especial énfasis en

---

<sup>1</sup> Para más detalle en técnicas de remoción de sedimentos, se puede consultar Ref. [59].

el diseño de pequeñas presas, donde por la magnitud y menor complejidad de la estructura, es aceptable y necesaria una estandarización del procedimiento de ingeniería a utilizar.

- Finalmente, se exponen las bondades tecnológicas de varios de los softwares actuales más potentes con aplicaciones para la ingeniería hidrológica e hidrogeológica, demostrando su mayor exactitud y precisión con los métodos computacionales modernos.

## **Alcances de la investigación**

Al contrario de un proyecto concebido desde sus inicios, esta tesis retoma y usa la información de varios estudios previos a nivel de perfil realizados en años anteriores. Por lo tanto, ya que el lugar del emplazamiento de la presa es fijo, por la información de ingeniería de detalle disponible, ya no se ejecuta la tradicional evaluación previa de ubicación óptima de la presa. Luego, se evaluará si es posible satisfacer la demanda agrícola proyectada para esta cerrada.

Para calcular la disponibilidad hídrica ofrecida, se realizan múltiples pasos de cálculo. Se empieza caracterizando la cuenca mediante el uso de información satelital y geofísica. Además, se ejecutan pre-dimensionamientos de la presa. Luego, se realizan procedimientos de tratamiento estadístico previo, y cálculo de parámetros morfométricos, así como el desarrollo del modelo de transformación de Temez y el balance hídrico en el embalse.

Otros procesos intermedios como el análisis de filtraciones y el cálculo del volumen muerto de sedimentos también se desarrollan de forma conveniente.

Como producto final, se presenta el dimensionado de la represa y el análisis de satisfacción de la demanda de riego agrícola. Además, se evalúa su sensibilidad ante el cambio climático.

## **Temas fuera del alcance**

Debido a la gran extensión del documento, escapan al alcance de esta tesis:

- Diseño de aliviadero de demasías: Incluye la laminación de la avenida extraordinaria.
- Estructuras hidráulicas conexas: obras de toma y de desagüe, entre otros, quedan fuera.
- Simulación de rotura de presa: no se justifica este tipo de modelamientos complejos debido al monto de inversión que significa construir una pequeña presa.

## **Visión a nivel local e internacional**

En específico, se busca que la tesis llegue a ser considerada un precedente importante para el establecimiento de una norma oficial para la caracterización de cuencas y el cálculo de la disponibilidad hídrica de pequeñas presas en cuencas no aforadas en Perú. Se espera que ante la futura publicación del referido manual en Perú, más países opten por tomar el mismo camino, estandarizando y enriqueciendo el modelamiento hídrico, tan necesario para poder producir a gran escala proyectos hidráulicos importantes a nivel social en el continente.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 TÓPICOS DE INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

La ciencia hidrológica ha sido ampliamente estudiada y documentada. Este acápite solo se limita a especificar ciertos aspectos puntuales sobre evapotranspiración y clases texturales de suelos. Para temas más elementales se recomienda revisar ref. [18] y [19].

#### Evapotranspiración de referencia

El concepto fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura de 0,12 m, con una resistencia superficial de  $70 \text{ s.m}^{-1}$  y un albedo de 0,23. Este cultivo ideal representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado.

La evapotranspiración de un cultivo ( $ET_c$ ) será distinta a la del cultivo de referencia ( $ET_o$ ) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Los efectos de las características que lo distinguen del pasto están incorporadas en el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).

#### Coeficiente de cultivo ( $K_c$ )

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto su altura como el área foliar varían progresivamente, por lo que existen diferencias en la ET y, por lo tanto, en el valor de  $K_c$ . Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial ( $K_{c \text{ ini}}$ ), mediados de temporada ( $K_{c \text{ med}}$ ), final de temporada ( $K_{c \text{ fin}}$ ), y las de desarrollo intermedio (fig 2.1-1).

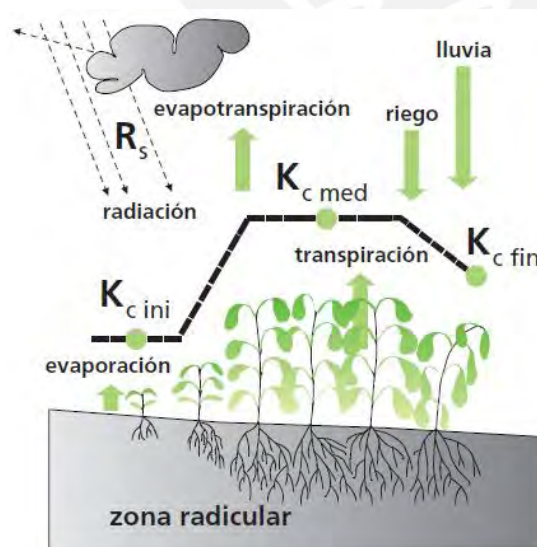


Figura 2.1-1 Curva generalizada del coeficiente de cultivo (FAO, 2006)

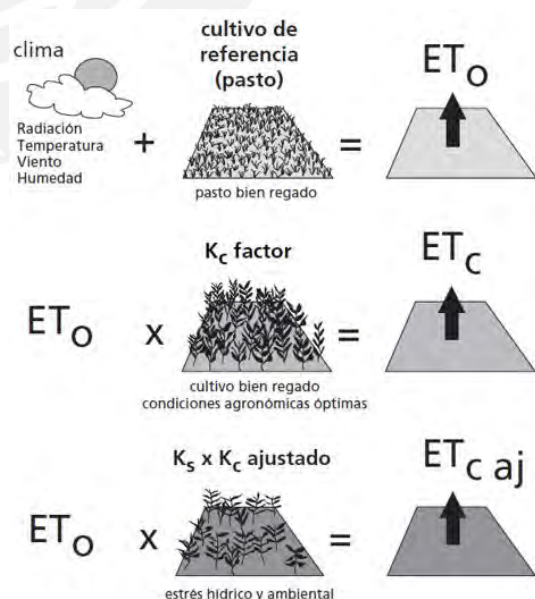


Figura 2.1-2 Evapotranspiración de referencia - $ET_o$ -, de un cultivo bajo condiciones estándar - $ET_c$ -, y no estándar - $ET_{c \text{ aj}}$ - (FAO, 2006)

Debido a que las superficies de las cuencas altoandinas están fuertemente dominadas por pastizales andinos y lagunas, usualmente basta solo con conocer estos coeficientes de cultivo, para lo cual se hace uso de las tablas referenciales proporcionadas por la FAO (cuadro 2.1-1).

Cultivo	$K_{c,ini}^1$	$K_{c,med}$	$K_{c,fin}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
<b>j. Forrajes</b>				
Rye Grass (heno) – efecto promedio de los cortes	0,95	1,05	1,00	0,3
<b>p. Especial</b>				
Agua libre, < 2 m de profundidad o en climas sub-húmedos o trópicos		1,05	1,05	
Agua libre, > 5 m de profundidad, sin turbidez, clima templado		0,65 <sup>25</sup>	1,25 <sup>25</sup>	

<sup>25</sup>Estos valores de  $K_c$  corresponden a aguas profundas en latitudes templadas donde se presentan cambios importantes de temperatura en el cuerpo de agua a través del año y donde tanto la evaporación inicial como la máxima son reducidas debido a la absorción de la energía radiante dentro del cuerpo de agua profunda. Durante los periodos de otoño e invierno ( $K_{c,ini}$ ), el calor es liberado por el cuerpo de agua, lo que genera una evaporación por encima de la evapotranspiración de referencia. Por lo tanto el valor de  $K_{c,med}$  corresponde al periodo donde el cuerpo de agua esta ganando energía térmica y el valor de  $K_{c,fin}$  se produce durante la liberación de energía térmica. Se deberá utilizar estos valores de  $K_c$  con suma precaución.

Fuentes principales:  $K_{c,ini}$ : Doorenbos y Kassam (1979);  $K_{c,med}$  y  $K_{c,fin}$ : Doorenbos y Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982), Snyder *et al.*, (1989)

**Cuadro 2.1-1** Coeficiente de cultivo  $K_c$  para pastos y cuerpos de agua superficial (FAO, 2006)

Por otro lado, existe un coeficiente final de ajuste ( $K_{c,aj}$ ), dado que bajo condiciones de campo se puede disminuir el crecimiento y densidad de las plantas, reduciendo la tasa de ET. Esto sucede principalmente debido al estrés hídrico, y a limitaciones ambientales y de prácticas de manejo (fig. 2.1-2). Sin embargo, dado que solo con un control sistematizado de agricultura es posible obtener ese tipo de información tan específica, se opta por descartar el uso de  $K_{c,aj}$ , y emplear de forma inicial la ET potencial que desarrolla el cultivo ( $ET_c$ ), pudiendo este valor preliminar ser distinto de la ET real, la cual se determinará por balance hídrico en el cap. 2.2.1.

## Método de Hargreaves

En la actualidad, el método de FAO Penman-Monteith se mantiene como el estándar para el cómputo de la  $ET_0$  desde datos meteorológicos, sin embargo, al ser un método que combina el balance energético con la transferencia de masa, requiere información de múltiples variables climáticas, lo cual vuelve compleja su determinación.

Si bien la FAO proporciona fórmulas simplificadas para el cálculo de las variables faltantes, puede ser conveniente utilizar criterios basados solo en la temperatura del aire, no obstante, estos métodos al ser empíricos requieren cuidadosas calibraciones locales para alcanzar resultados satisfactorios. Una excepción posible es el método de Hargreaves, que ha producido valores razonables de  $ET_0$  con cierta validez global (FAO, 2006).

La fórmula de Hargreaves - Samani para evaluar la evapotranspiración necesita solamente datos de temperaturas y de radiación solar. La expresión simplificada es la siguiente:

$$ET_0 = 0,0023 (t_{med} + 17,78) R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0,5}$$

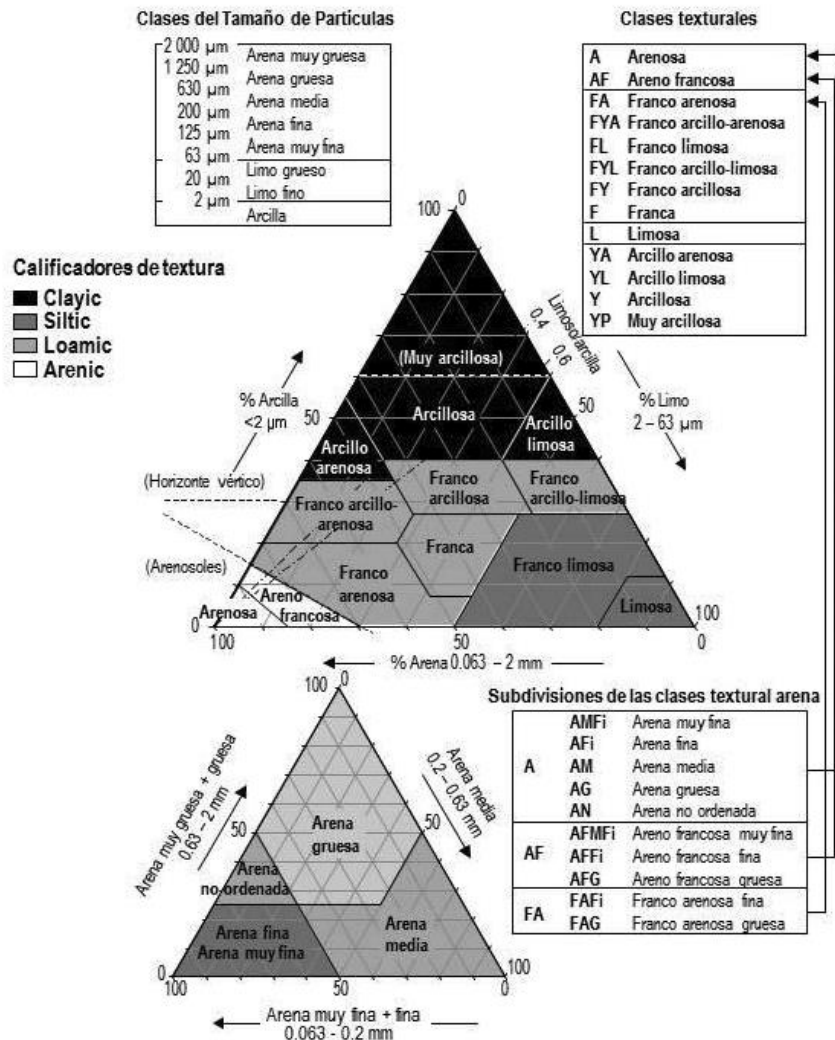
donde:

- $ET_0$  = Evapotranspiración de referencia diaria, mm/día
- $t_{med, \text{máx y min}}$  = Temperatura media, máxima y mínima diaria, °C
- $R_0$  = Radiación solar extraterrestre, convertida en mm/día

### Clase textural del suelo USDA

A diferencia del sistema *SUCS*, este sistema de clasificación establece grupos de suelos con comportamiento análogo frente al agua y las plantas (Porta et al, 2003).

La textura USDA expresa al suelo con las proporciones de las partículas minerales inferiores a 2 mm. Las combinaciones posibles en los porcentajes de arcilla, limo y arena se agrupan en unas pocas clases de tamaño de partículas o clases texturales<sup>2</sup>, y su determinación se realiza mediante un diagrama conocido como el triángulo textural de suelos (fig. 2.1-3).



**Figura 2.1-3** Relación de los constituyentes de suelo por tamaño, definiendo las clases texturales y subclases de arena (USDA, 1967, adaptado por FAO, 2015)

<sup>2</sup> El calificativo “Franco” (*Loam*) se puede encontrar también bajo la denominación “Marga” o “Migajón”

## 2.2 MODELO MENSUAL DE TRANSFORMACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCURRIMIENTO

### El sistema hidrológico

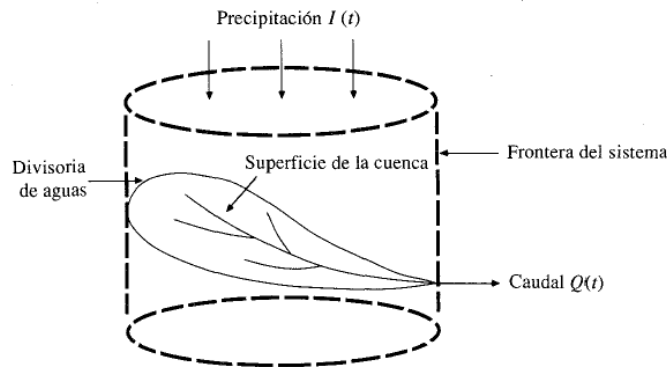


Figura 2.2-1 La cuenca como un sistema hidrológico (Chow, 1994)

*“Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se les entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo. El ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo. Estos componentes pueden agruparse en subsistemas más simples que pueden analizarse separadamente y luego combinar los resultados de acuerdo con sus interacciones, para así al final analizar el sistema en su totalidad”*

*Ven Te Chow, 1994*

### Modelamiento hidrológico continuo

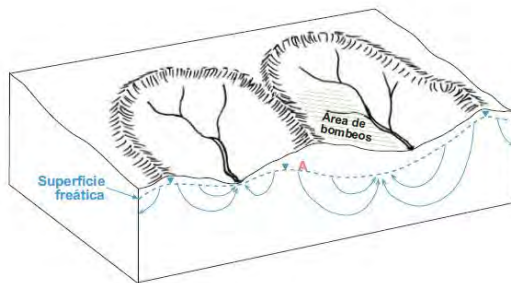
Desde la unidad de estudio que se define en la cuenca hidrológica, se precisan los componentes y sus interacciones, modelando la realidad hacia un esquema teórico que pueda ser usado como base para realizar procesamientos posteriores que estimen las cantidades de agua necesarias para proyectar las grandes obras de la ingeniería hidráulica.

En base a este modelo conceptual del comportamiento del sistema hidrológico, es posible crear un modelo de simulación continua que, mediante algoritmos especialmente diseñados, busca representar y cuantificar los procesos físicos que ocurren en la cuenca hidrológica.

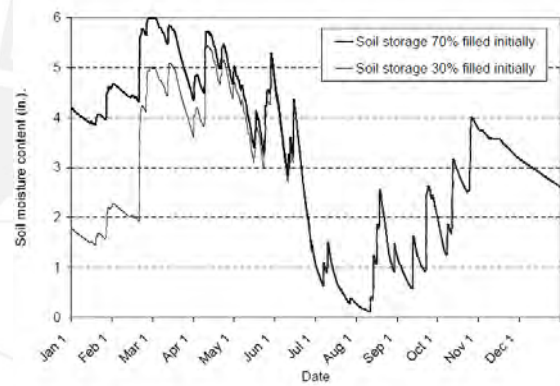
Debido a los largos períodos de evaluación de datos (que usualmente son años, sino décadas de procesamiento de datos), y a diferencia de los modelos de eventos extremos, estos toman en consideración los procesos lentos de transferencia hídrica de la cuenca, tales como el flujo en acuíferos o la evapotranspiración, que pueden marcar diferencias substanciales mes a mes con sus flujos máxicos totales acumulados.

En definitiva, los modelos continuos aplican simulaciones de balance hídrico por largos periodos de tiempo, con el fin de determinar la denominada oferta hídrica de la cuenca, expresada en el volumen de agua procedente de los sistemas de drenaje superficial.

Por otro lado, si bien los efectos de trasvase de flujos subterráneos pueden ser determinantes en un estudio de balance hídrico de cuencas pequeñas, se asume que los gradientes de carga hidráulica en la superficie freática siguen la tendencia topográfica, ya que, como se ve luego en el cap. 3.2, no hay evidencia de factores que puedan desencadenar diferencias importantes en los niveles piezométricos esperados, tales como fallas geológicas, influencias zonales de pozos de bombeo (fig. 2.2-2), entre otros. Por lo tanto, para el modelo conceptual se considera que la cuenca hidrogeológica es equivalente a la cuenca hidrográfica superficial.



**Figura 2.2-2** Esquemización de la influencia de bombeos intensivos y continuos en la modificación de la superficie freática (Sánchez, 2013)



**Figura 2.2-3** Comparación de los registros de la humedad del suelo a partir de simulaciones con dos condiciones iniciales distintas (McEnroe, 2010)

## Sensibilidad a las condiciones iniciales

Principalmente, la condición inicial de humedad puede afectar en gran medida la cantidad de escorrentía en los primeros meses de la simulación, sin embargo, este efecto en general no sobrepasa el año, por lo que no afecta a la escorrentía a largo plazo (McEnroe, 2010).

Se muestra dicho efecto comparando los registros de la humedad del suelo de dos simulaciones con diferentes condiciones iniciales. Los dos histogramas mostrados (fig. 2.2-3) convergen gradualmente y se vuelven idénticos después de algunos meses. Por lo tanto, se recomienda excluir los resultados del primer año de simulación, dado que los contenidos de humedad (y por tanto, la escorrentía) se ven significativamente influenciados por la condición inicial.

### 2.2.1 ESTRUCTURA DEL MODELO DE TÉMEZ

Este modelo agregado de balance hídrico es de pocos parámetros y variables, y reproduce el ciclo hidrológico de manera continua en el tiempo a escala mensual.

El modelo realiza una valoración global del área de estudio, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, sustituyéndolos por valores medios, por lo que se limita su aplicación a cuencas pequeñas en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica (Paredes et Al, 2014).

Todo el proceso está gobernado por los principios de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance (fig. 2.2-4). El modelo considera dos capas de suelo: una superior no saturada, y una inferior saturada (acuífero), generadoras de los flujos superficiales rápido y lento, respectivamente, las cuales se consideran como embalses (fig. 2.2-5).

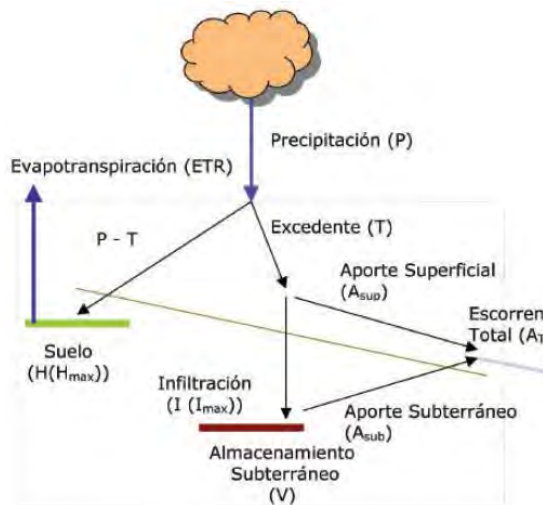


Figura 2.2-4 Esquema de entradas y salidas en el Modelo de Témez (DINAGUA, 2011)

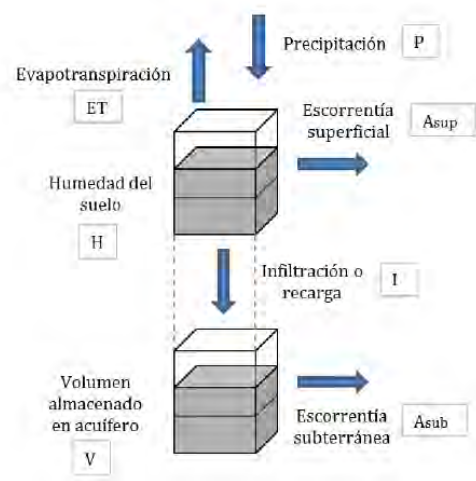


Figura 2.2-5 Sistema de flujos y almacenamiento del Modelo de Témez (Paredes et al, 2014)

A continuación, se presentan los *Algoritmos de simulación del escurrimiento de Témez*.

### Cálculo del excedente

Se considera que una fracción del agua que precipita sobre el terreno (P) es almacenada en la zona superior del suelo (H), y que el resto, el excedente (T), se distribuye entre el aporte al escurrimiento de origen superficial ( $A_{sup}$ ) y la infiltración hacia el acuífero (I) o recarga.

El excedente total (T) se calcula según la siguiente ley:

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_{oi}$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2P_{oi}} \quad \text{si } P_i > P_{oi}$$

siendo:

$$\delta_i = H_{max} - H_{i-1} + ETP_i$$

$$P_{oi} = C(H_{max} - H_{i-1})$$

donde las variables son:

- $P_i$  = Precipitación en el mes  $i$
- $T_i$  = Excedente en el mes  $i$
- $ETP_i$  = Evapotranspiración potencial en el mes  $i$

- $H_{i-1}$  = Humedad en el suelo no saturado al final del mes anterior  $i-1$

y los parámetros:

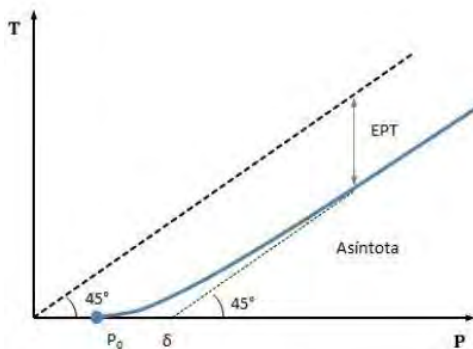
**C = Coeficiente de inicio de excedencia (parám. 1)**

Es un factor adimensional que define el inicio de la escorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo,  $H_{m\acute{a}x}$ . Este parámetro es fundamental para definir posteriormente el *Umbral de precipitación*  $P_0$ , desde el cual ocurre la escorrentía.

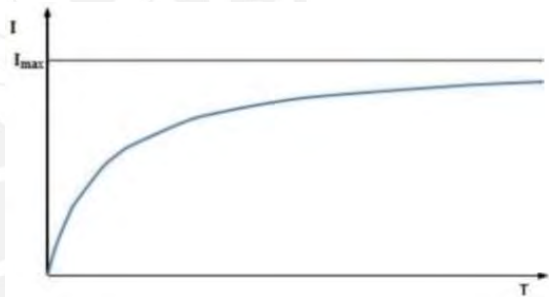
**$H_{m\acute{a}x}$  = Capacidad máx. de retención de agua en suelo no saturado -mm- (parám. 2)**

Incluye el almacenamiento superficial en depresiones y la interceptación foliar. El valor de  $H_{m\acute{a}x}$  aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención de agua en el suelo y el espesor de este que puede ser drenado por evapotranspiración. Su determinación es vital para el posterior cálculo del *Déficit máximo de humedad del suelo*  $\delta$ .

De este modo, cuando la cantidad de lluvia es inferior a  $P_0$  toda el agua de lluvia se almacena como humedad del suelo (siendo susceptible de convertirse en evapotranspiración) y el excedente total es nulo. A partir del valor de  $P_0$ , la precipitación incrementa simultáneamente el excedente y la componente de humedad del suelo. La curva que expresa los excedentes no es lineal, parte de 0 para  $P=P_0$  y tiende a  $P-\delta$  para lluvias altas (fig. 2.2-6).



**Figura 2.2-6** Ley de excedentes  
(Paredes et al, 2014)



**Figura 2.2-7** Ecuación que relaciona la infiltración con el excedente existente (Paredes et al, 2014)

## Cálculo del almacenamiento superficial y la infiltración

Una vez estimado el excedente  $T$ , la humedad del suelo al final del período se obtiene como:

$$H_i = \max \left[ \begin{array}{l} 0 \\ H_{i-1} + P_i - T_i - ETP_i \end{array} \right]$$

Lo cual representa el cierre del balance entre el agua que queda en el suelo y la ETP. Si el resultado es negativo la humedad del suelo al final del periodo es nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá desarrollado en su totalidad.

Por lo tanto, la ET real que se produce se obtiene mediante la expresión condicional:

$$ETR_i = \min \left[ \begin{array}{l} H_{i-1} + P_i - T_i \\ ETP_i \end{array} \right]$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la ETP. En caso de no haberla, la humedad en el suelo al final de mes será nula.

Asimismo, la infiltración hacia el acuífero adopta una ley empírica (fig. 2.2-7), que es función del excedente (T) y de **la infiltración máxima  $I_{\text{máx}}$  -mm/mes- (parám. 3)**, que es la máxima cantidad que puede infiltrarse en el terreno.

Esta distribución asegura que la infiltración aumente con el excedente, tendiendo asintóticamente a su máximo, el parámetro  $I_{\text{máx}}$ :

$$I_i = I_{\text{máx}} \frac{T_i}{T_i + I_{\text{máx}}}$$

Además, si el excedente es nulo, la infiltración también lo es. La infiltración máxima no depende exclusivamente de las propiedades del terreno, sino también de la intensidad y concentración de las precipitaciones, dependiendo de que la lluvia sea esporádica o persistente (Témez, 1977, citado por Paredes et al, 2014).

### Cálculo del aporte superficial

La parte del excedente (T) que no infiltra al acuífero se asigna como escorrentía superficial al final del mes:

$$A_{\text{sup } i} = T_i - I_i$$

### Cálculo del aporte subterráneo

Para simular el comportamiento del acuífero se plantea un modelo unicelular basado en una función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial.

En esta expresión la variable es el volumen almacenado en el acuífero (V), y el caudal cedido a la red superficial (Q) se obtiene mediante el planteamiento anterior, y un balance de masas:

$$Q_i = \alpha V_i$$

$$\frac{dV_i}{dt} = I_i - Q_i$$

donde las demás variables ya fueron definidas, y:

**$\alpha$  = coeficiente de agotamiento del acuífero -mes<sup>-1</sup> - (parám. 4)**

Es la inversa de la **constante de recesión  $K$** , que determina el tiempo en que permanece el agua almacenada en el acuífero, por lo tanto, el coeficiente de descarga determina la tasa unitaria a la que el volumen deja el cuerpo subterráneo. El parámetro  $\alpha$  es más grande en cuencas pequeñas o en acuíferos poco importantes (Molina & Espinoza, 2005).

Resolviendo la ecuación diferencial, y asumiendo una recarga concentrada en la mitad del mes, se obtiene el siguiente par de ecuaciones:

$$V_i = V_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + I_i \cdot e^{-\frac{\alpha t}{2}}$$

$$Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha t} + \alpha \cdot I_i \cdot t \cdot e^{-\frac{\alpha t}{2}}$$

Este modelo subterráneo presenta una ventaja de simplicidad de cálculo, pero también supone una simplificación excesiva del sistema, por lo que queda reducida su utilidad a pequeños acuíferos. Por ejemplo, no es válido para modelar acuíferos cársticos, donde se ha identificado más de una rama de descarga en el agotamiento del acuífero (Estrela & Sahuquillo, 1985, citados por Paredes et al, 2014).

De esta forma, el aporte subterráneo  $A_{sub}$  es:

$$A_{subi} = V_{i-1} - V_i + I_i$$

Finalmente, la escorrentía total  $A_T$  se calcula:

$$A_{T_i} = A_{sup_i} + A_{sub_i}$$

En definitiva, el modelo de Témez contempla el ajuste de cuatro parámetros:  $H_{m\acute{a}x}$ ,  $C$ ,  $I_{m\acute{a}x}$  y  $\alpha$ . Los parámetros  $H_{m\acute{a}x}$  y  $C$  regulan el almacenamiento de agua en el suelo,  $I_{m\acute{a}x}$  separa la escorrentía superficial de la subterránea y el parámetro  $\alpha$  regula el drenaje subterráneo. Es también necesaria la definición de las condiciones iniciales de simulación: la humedad inicial del suelo ( $H_0$ ) y el almacenamiento inicial en el acuífero ( $V_0$ ), aunque, como ya se vio, el efecto de los valores iniciales se reduce de forma acelerada a medida que transcurre el tiempo.

## 2.2.2 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO

### Análisis de sensibilidad

El DINAGUA, como parte del apartado hidrológico e hidráulico de su Manual de diseño y construcción de pequeñas presas del Uruguay, realizó la calibración de los parámetros del modelo a nivel regional mediante la optimización del número de Nash. En el mencionado estudio se observó que el modelo no tiene gran sensibilidad en los parámetros  $C$ ,  $I_{m\acute{a}x}$  y  $\alpha$ , por este motivo se decidió calibrar un solo valor de cada uno para todo el país (DINAGUA, 2011):

Parámetro	CAD	CPo	$\alpha(1/día)$	$I_{max}(mm)$
Valor calibrado	0.92	0.30	0.0775	386

**Cuadro 2.2-1** Valores calibrados de los parámetros del modelo de Témez (DINAGUA, 2011)

Donde CAD es una constante propuesta para relacionar proporcionalmente  $H_{m\acute{a}x}$  y el *Agua Disponible Total* (ADT) en los suelos del Uruguay.

Por otro lado, el *Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos (GIRH) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV)* recomienda rangos orientativos entre los que pueden oscilar los parámetros, aunque es posible que el valor pueda superar estos límites (Paredes et al, 2014).

	$H_{max}(mm)$	$C$	$I_{max}(mm)$	Alfa ( $mes^{-1}$ )
Min	50	0.2	10	0.001
Max	250	1	150	0.9

**Cuadro 2.2-2** Rangos de los parámetros del modelo de Témez (Paredes et al, 2014)

## Métodos y rangos específicos de estimación

### a) Capacidad máx. de retención de agua en el suelo no saturado, $H_{m\acute{a}x}$ (mm)

Existen varios criterios para determinar este parámetro. A nivel de Latinoamérica, dos metodologías requieren especial mención: el estudio de “Agua disponible en suelos del Uruguay” del DINAGUA y la “Metodología de Procedimientos metodológicos de la zonificación agroecológica y socioeconómica” del ZONISIG.

Sin embargo, ambas metodologías necesitan de una caracterización precisa de la capa orgánica superficial, por lo que, tal como se explica en el cap. 3.2.3, debido a limitaciones en la información disponible, no es posible aplicar adecuadamente estos procedimientos.

Debido a esta situación,  $H_{m\acute{a}x}$  se estima mediante el criterio propuesto por el GIRH de la UPV<sup>3</sup>, que realiza una correlación con el uso del suelo y la cobertura superficial (cuadro 2.2-3). Asimismo, de tener referencia de niveles freáticos superficiales, estos se deben considerar aparte, ya que el parámetro es distinto para cuerpos de agua.

Uso del suelo	Hmax (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

**Cuadro 2.2-3** Valores referenciales de  $H_{m\acute{a}x}$   
(Estrela et al., 1999, citado por Paredes et al, 2014)

Litología	Imax (mm)
Mat. aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

**Cuadro 2.2-4** Valores aproximados de  $I_{m\acute{a}x}$   
(Estrela et al., 1999, citado por Paredes et al, 2014)

### b) Capacidad máxima de infiltración, $I_{m\acute{a}x}$ (mm/mes)

Dependiendo de la persistencia de la lluvia y de las propiedades del terreno, este coeficiente suele tomar valores comprendidos entre 100 – 400 mm/mes, (Témez, 1977, citado por Paredes et al, 2014). Otros autores proponen estimarlo a partir de las características hidrogeológicas de la cuenca (Molina & Espinoza, 2005).

---

<sup>3</sup> También hubiese sido posible hallar  $H_{m\acute{a}x}$  mediante su correlación con texturas asociadas a clases edafológicas (USDA-MAG, 1985, citado por Barberà, 2007)

Nuevamente, debido a limitaciones en la información de campo, se estima  $I_{\text{máx}}$  con el criterio del GIRH de la UPV (cuadro 2.2-4), el cual propone valores promedio de infiltración máxima para un estrato o litología específica.

**c) Coeficiente de inicio de excedencia, C (adimensional)**

El rango típico se encuentra entre 0.10 – 0.40, aunque su valor más frecuente es 0.30 (Témez, 1977, citado por Molina & Espinoza, 2005).

**d) Coeficiente de agotamiento del acuífero  $\alpha$  (1/mes)**

La bibliografía especializada indica valores en el rango de 0.005 a 0.10 -1/día- (DHI, 2000, citado por Molina & Espinoza, 2005).

En principio,  $\alpha$  se determina mediante aflujos sucesivos durante la estación seca, sin embargo, en cabeceras de cuenca esta práctica es inusual, por lo que se recurre a las ecuaciones empíricas desarrolladas por Lutz Scholz para cuatro clases de cuencas, como parte del alcance de su modelo determinístico – estocástico para la generación de caudales en cuencas de la sierra peruana, tomando en consideración la influencia del clima, la geología, la cobertura vegetal y el área de la cuenca (Aguirre, 1992).

Entre las aquellas fórmulas, se ha seleccionado la siguiente por representar mejor el ámbito de cabeceras de cuenca altoandinas: “Cuencas con agotamiento rápido. Retención reducida con vegetación poco desarrollada (puna)”, para la cual el coeficiente de agotamiento del acuífero queda determinado mediante su ecuación característica:

$$\alpha = -0.00252(\ln A) + 0.030 \text{ día}^{-1}$$

**Ecuación 2.2-1** Fórmula para cálculo de  $\alpha$  en Puna (Scholz, 1980, citado por Aguirre, 1992)

siendo: A = área de la cuenca -km<sup>2</sup>-

## **2.3 INGENIERÍA DE PEQUEÑAS PRESAS**

### **2.3.1 DISEÑO DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS**

El ámbito de aplicación del proyecto está limitado solo a pequeñas presas de materiales sueltos, es decir, aquellas que no puedan encuadrarse en la definición de “*Gran Presa*”, la cual hace referencia a toda presa con altura mayor a 15 m., o bien la que teniendo entre 10 - 15 m. de altura cumpla con alguna de las siguientes condiciones (ICOLD, citado por DINAGUA, 2011):

- Largo de coronamiento mayor a 500 m
- Volumen de almacenamiento mayor a 1 MM<sup>3</sup>
- Capacidad de descarga mayor a 2.000 m<sup>3</sup>/s
- Fundaciones especialmente complicadas o diseño inusual

## Componentes del volumen embalsado

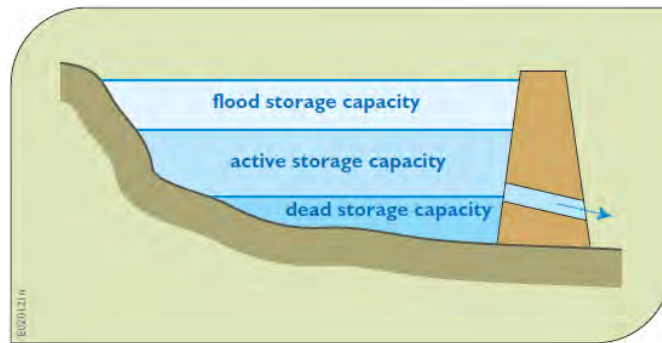


Figura 2.3-1 Componentes del volumen de almacenamiento de un reservorio (Loucks & Van Beek, 2017)

El almacenamiento de un reservorio (fig. 2.3-1) se puede dividir en tres usos principales:

- **Capacidad útil o activa:** utilizada para la regulación del flujo aguas abajo y para el suministro de agua, desarrollo recreativo o producción hidroeléctrica.
- **Volumen muerto:** reservado principalmente para la recolección de sedimentos. Adicionalmente, incluye un **Volumen inactivo**, dado que el punto de toma debe estar suficientemente por debajo del almacenamiento útil para vaciar totalmente el embalse.
- **Almacenamiento para control de inundaciones:** reservada para la laminación de caudales durante eventos de avenidas extremas. Junto al volumen comprendido en el borde libre, constituyen la **Capacidad de contingencia**, la cual controla adicionalmente otros fenómenos como el oleaje producido por vientos dominantes, etc.

## Tipología de presa

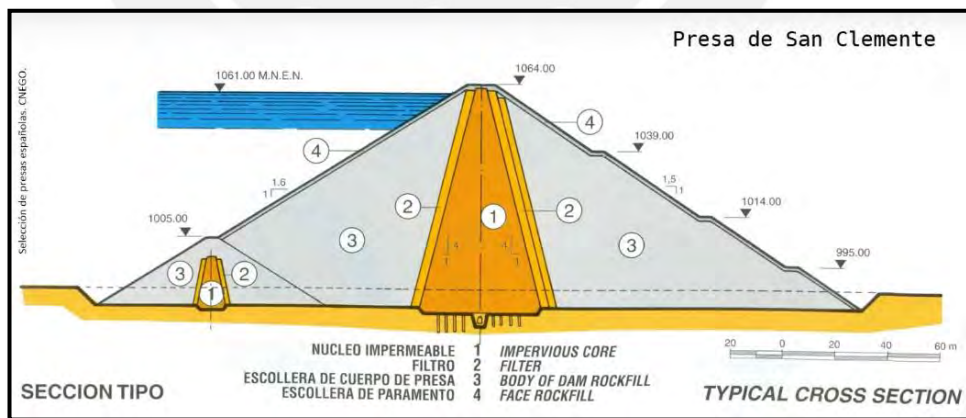


Figura 2.3-2 Ejemplo de presa de escollera con núcleo RMA (SPANCOLD, 1994)

Si bien la elección del tipo de presa se adecúa a la cantidad y diversidad de materiales disponibles, y no al revés, es usual que las presas para uso agrícola sean de materiales sueltos (presas de tierra o de escollera con núcleo central), debido a su menor costo y su buena versatilidad de ingeniería. El diseño moderno de este tipo de presas (fig. 2.3-2) contempla una distribución de materiales heterogénea y zonificada, que comprende entre sus componentes:

- **Núcleo impermeable:** con el objetivo de mantener la estanqueidad del represamiento, esta capa actúa como una barrera hidráulica contra las filtraciones excesivas. Se conforma de materiales con muy baja conductividad hidráulica, tales como las arcillas.
- **Espaldones:** son las zonas del cuerpo de presa que soportan al núcleo. Aportan la estabilidad y la resistencia al conjunto, por lo que definen en gran medida los taludes de la presa. Para alcanzar la estabilidad óptima, es necesario evitar la formación de presiones intersticiales excesivas, ya sea por niveles freáticos altos en el talud aguas abajo, como por efectos de desembalse rápido en el talud aguas arriba, por lo que se usan materiales granulares suficientemente drenantes, como gravas arenosas. Asimismo, para lograr taludes más inclinados, se puede mejorar la estabilidad mecánica con el uso de *geomallas*.
- **Transiciones o filtros:** este material intermedio tiene como fin asegurar la separación entre capas diferenciadas, y, por lo tanto, reducir los problemas de tubificación interna por el arrastre de finos. Para material de filtro se usan tradicionalmente arenas, sin embargo, en tiempos recientes se usan *geotextiles*.
- **Drenes:** con el propósito de captar y redirigir flujos internos hacia zonas adecuadas para su control y desfogue, se diseñan drenes horizontales e inclinados, si el material de cuerpo de presa no es lo suficientemente autodrenante. Se usan materiales granulares con buena conductividad hidráulica como gravas bien graduadas. También es posible usar *geonets*.
- **Coraza protectora:** es necesario recubrir los taludes con un material especialmente grueso que resista la erosión producida por el oleaje, la lluvia, etc. Usualmente, se utiliza escollera por encima de *geomembrana*, la cual otorga impermeabilidad extra a la presa.

### Criterios básicos para la cimentación

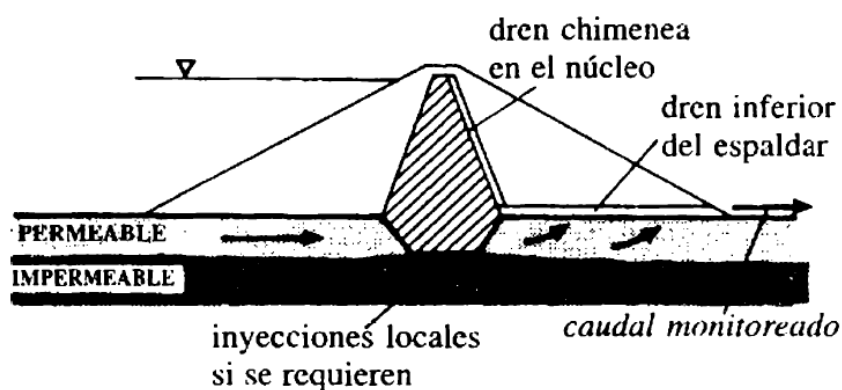


Figura 2.3-3 Presa zonificada con zanja de impermeabilización total en núcleo (Novak et Al., 2001)

Una presa de materiales sueltos se puede cimentar sobre roca o suelo, sin embargo, existen estratos especialmente desfavorables que se deben evitar, por lo que como mínimo se debe retirar la primera capa superficial de suelo orgánico *-top soil-*, y las capas debajo de la zona de actuación de la presa con capacidad portante baja y de conductividades hidráulicas altas.

En el escenario especial en que el cimiento sea permeable y poco profundo<sup>4</sup> (como en el caso de estudio), el medio más adecuado para controlar las filtraciones y asegurar que no se produzca una falla por sifonamiento a través de los cimientos, o subpresiones en el pie del paramento de aguas abajo, es a través de una *zanja de impermeabilización* que llegue hasta el lecho rocoso u otro estrato impermeable (fig. 2.3-3). Este elemento actúa como barrera hidráulica en la cimentación (debe ubicarse ligeramente aguas arriba del eje de la presa), además aumenta la estabilidad del núcleo impermeable, dado que su dentellón va unido a este.

La anchura inferior adecuada se determina de acuerdo a la fórmula del *Bureau of Reclamation*:

$$W = h - d$$

donde: w = Anchura del fondo de la zanja de impermeabilización (m)  
h = Carga de agua del embalse (m)  
d = Profundidad de la zanja por debajo del terreno (m)

**Ecuación 2.3-1** Anchura menor de zanja (Bureau of Reclamation, 2007)

## Pre-dimensionamiento

### Ancho de corona

Esta medida está en función de la altura de la presa y los análisis de estabilidad, aunque se recomienda un ancho mínimo de 3 m. (fig. 2.3-4). Existen normativas de varios países que proporcionan fórmulas para su determinación, entre las más reconocidas se encuentra la expresión recomendada por el *Bureau of Reclamation*:

$$A = \frac{H}{5} + 3$$

donde: A = Ancho de coronación (m)  
H = Altura de la presa (m)

**Ecuación 2.3-2** Ancho de corona (Bureau of Reclamation, 2007)

### Geometría y materiales constituyentes

La inclinación de los taludes está en función de la estabilidad de la presa, para lo cual se deben ejecutar diversos análisis que definen los valores adecuados, sin embargo, de forma preliminar, es posible usar valores referenciales. El *Bureau of Reclamation*, con base en la posibilidad de desembalse rápido, recomienda taludes y materiales para la construcción de los terraplenes (cuadro 2.3-1), así como la proporción geométrica del núcleo proyectado en función del grado de permeabilidad del cimiento (fig. 2.3-4). Del mismo modo, la base mayor del núcleo impermeable se fija de una longitud mínima igual a la altura de la presa, actuando además como umbral superior de la zanja de impermeabilización. Por último, también se recomienda un espesor y granulometría específica para la escollera protectora (cuadro 2.3-2).

<sup>4</sup> En pequeñas presas este término está asociado a profundidades menores a la altura de la presa.



Figura 2.3-4 Proporción de núcleos impermeables en presas de tierra (Bureau of Reclamation, 2007)

Tipo	Objeto	Sujeto a desembalse rápido <sup>2</sup>	Clasificación del material de revestimiento	Clasificación del material del núcleo <sup>3</sup>	Talud aguas arriba	Talud aguas abajo
Zona con núcleo mínimo A <sup>1</sup>	Cualquiera	No crítico <sup>4</sup>	Escollera, GW,GP,SW (con gravas) o SP (con gravas)	GC,GM,SC, SM,CL,ML, CH o MH	2:1	2:1
Zona con núcleo máximo <sup>1</sup>	Retención o embalse	No	Escollera, GW,GP,SW (con gravas) o SP (con gravas)	GC,GM, SC,SM, CL,ML, CH,MH	2:1 2,25:1 2,5:1 3:1	2:1 2,25:1 2,5:1 3:1
Zona con núcleo máximo <sup>1</sup>	Embalse	Si	Escollera, GW,GP,SW (con gravas) o SP (con gravas)	GC,GM, SC,SM, CL,ML, CH,MH	2,5:1 2,5:1 3:1 3,5:1	2:1 2,25:1 2,5:1 3:1

<sup>1</sup> El tamaño de los núcleos mínimo y máximo se indican en la figura 6-43.

<sup>2</sup> El desembalse rápido es de 15 cm ó más por día después de un prolongado almacenamiento con altos niveles de embalse.

<sup>3</sup> Los suelos OL y OH no son recomendados en grandes proporciones para núcleos de presas de tierra homogéneas. Los suelos Pt son inadecuados.

<sup>4</sup> El desembalse rápido no afectará el talud de aguas arriba de un terraplén que tenga una gran zona permeable de revestimiento.

Cuadro 2.3-1 Taludes y materiales recomendados para presas de tierra (Bureau of Reclamation, 2007)

Fetch del embalse, km	Espesor nominal en cm	Peso de la escollera(kg) para varios porcentajes (en peso) <sup>1</sup>			
		Tamaño máximo	40 a 50%	50 a 60 %	<sup>2</sup> 0 a 10 %
≤ 4	75	1125	> 565	35 a 565	< 35
> 4	90	2000	> 1000	45 a 1000	< 45

<sup>1</sup> La arena y el polvo de la roca deben de suponer menos del 5 %, en peso, del total de la escollera

<sup>2</sup> El porcentaje de este tamaño de material no debe exceder la cantidad que pueda rellenar los huecos entre las grandes piedras

Cuadro 2.3-2 Espesor y granulometría recomendados para la escollera (Bureau of Reclamation, 2007)

## Resguardo y borde libre

Se entiende por resguardo a la distancia que existe entre el nivel superior del dique y el máximo del embalse. El "borde libre normal" se define como la diferencia de altura entre la coronación de la presa y el nivel normal de embalse, fijado por las necesidades del proyecto. El "borde libre mínimo" se define como la diferencia de altura entre la coronación y el máximo nivel de embalse que puede producirse durante la avenida de proyecto, asumiendo que el aliviadero y los desagües funcionan conforme a lo previsto (Bureau of Reclamation, 2007).

Por lo tanto, según el criterio del *Bureau of Reclamation* (citado por DINAGUA, 2011):

- a) Es *borde libre normal* para considerar el efecto de la ola máxima que se desarrolla con el embalse en la cota de inicio de vertido, por lo que:
- b) Es *borde libre mínimo* para considerar el efecto de la ola máxima que se desarrolla en el embalse cuando se produce la lámina máxima de vertido (E), por lo que:

$$\text{Resguardo} = \text{BL}_{\text{Normal}}$$

$$\text{Resguardo} = E + \text{BL}_{\text{Mínimo}}$$

\* El resguardo es el mayor de los dos valores.

Las olas producidas en el embalse dependen de su morfometría y su orientación respecto a los vientos dominantes. Este efecto se cuantifica a través del *Fetch*, el cual se detalla como la distancia en la que el viento puede actuar sobre la masa de agua del embalse. Una simplificación válida es definirlo sobre la normal al eje del terraplén, a la altura del nivel de vertido (DINAGUA, 2011). Con la determinación del *Fetch* máximo (fig. 2.3-5), se define el borde libre con el cuadro 2.3-3. Para pequeñas presas, usualmente es suficiente con el primer valor por su reducido espejo de agua.



**Figura 2.3-5** Determinación del Fetch máximo en espejo de agua irregular (elab. propia)

Fetch (km)	BL <sub>Normal</sub> (m)	BL <sub>Mínimo</sub> (m)
<1,6	1,2	0,9
1,6	1,5	1,2
4,0	1,8	1,5
8,0	2,4	1,8
16,1	3,0	2,1

**Cuadro 2.3-3** Borde libre según Fetch (Bureau of Reclamation, 1987, citado por DINAGUA, 2011)

Como se menciona en el capítulo inicial (cap. 1.2), por estar fuera del alcance de la tesis no se realiza laminación en embalses, por lo que se toma directamente el valor del BL<sub>normal</sub>.

### 2.3.2 BALANCE HÍDRICO EN RESERVIORIOS

Como se sabe, la altura de una presa pequeña tiene un límite, 15 metros. Esta restricción condiciona de manera significativa el rango de elevaciones que puede tomar la estructura, por lo que análisis de pre-dimensionado de embalses que usan la capacidad útil que satisface el 100% de la demanda como función objetivo (p. ej. método de los picos secuenciales), no son óptimos. En su lugar, se usa un modelo de simulación para calcular las demandas posibles a ser atendidas, ya que permite acotar mejor los valores de las alturas evaluadas.

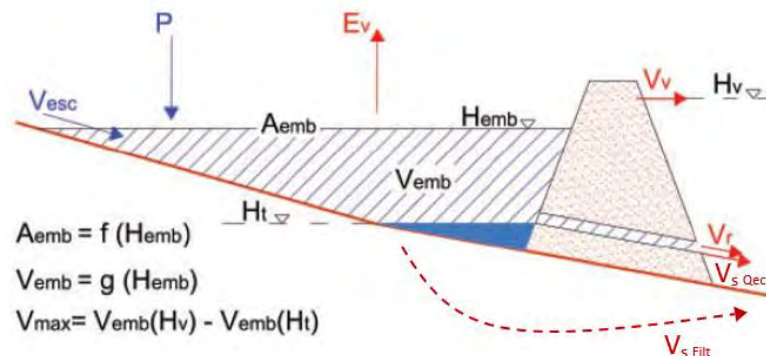


Figura 2.3-6 Elementos del balance hídrico en el reservorio (modificado de DINAGUA, 2011)

Básicamente, el proceso consiste en calcular mensualmente en el embalse el volumen que se pudo entregar para el riego ( $V_r$ ), teniendo una demanda agrícola a cubrir ( $V_d$ ), y en base a la geometría del volumen útil del embalse (determinado por la cota de toma,  $H_t$ , y de vertido,  $H_v$ ). El procedimiento incluye la definición previa de múltiples variables (fig. 2.3-6), para lo cual es necesario identificar las entradas y salidas del sistema:

#### Aportaciones:

- Escorrentía de la cuenca ( $V_{esc}$ )
- Precipitación directa en el embalse ( $P$ )

#### Pérdidas:

- Vol. entregado por riego agrícola ( $V_r$ )
- Evaporación en el embalse ( $E_v$ )
- Vertido por encima del aliviadero ( $V_v$ )
- Salidas hídricas varias ( $V_s$ ):  
filtraciones, caudal ecológico, etc.

A continuación, se explican los *Algoritmos de operación del embalse*.

### Parametrización de la geometría del embalse

El relevamiento topográfico de la zona de emplazamiento del embalse queda representado mediante sus curvas cota-área-volumen, sin embargo, para la ejecución del balance hídrico es indispensable obtener funciones continuas de las relaciones volumen – altura y área – altura.

Estas ecuaciones representativas del embalse se ajustan mejor a una escala logarítmica (DINAGUA, 2011), por lo que con este fin se calcula una cota especial ( $H^*$ ), utilizando las áreas medidas ( $A_i$ ) y las cotas ( $H_i$ ) en el rango de niveles entre la obra de toma y el vertedero:

$$H^* = \text{promedio} \left[ \left( \sqrt{\frac{A_i}{A_0}} H_0 - H_i \right) / \left( \sqrt{\frac{A_i}{A_0}} - 1 \right) \right]_{i=1}^{i=n}$$

Con las alturas virtuales calculadas por las diferencias  $H_i - H^*$  y sus áreas correspondientes, se ajusta la función  $A_{\text{emb}}$ , calculando los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  por mínimos cuadrados de las funciones logarítmicas. Luego, la función  $V_{\text{emb}}$  resulta de integrar  $A_{\text{emb}}$ .

Finalmente, las funciones de la geometría del embalse presentan las siguientes distribuciones:

$$A_i = \alpha (H_i - H^*)^\beta, \quad V_{\text{emb } i} = 0.01 \alpha / (\beta + 1) (H_i - H^*)^{\beta+1}$$

### Evaporación potencial en el embalse

Tal como se vio previamente, para lagunas someras ( $h < 2$  m.) el coeficiente de cultivo de 1.05 es constante (cuadro 2.1-1), sin embargo, en cuerpos de agua superficial profundos ( $h > 5$  m.) existe una distorsión en la distribución estacional de la ETP producida, debido al efecto de retardo térmico originado por la absorción y retención temporal de energía de radiación dentro del embalse. Sin embargo, este ciclo de amortiguación y retraso solo se completa en grandes embalses, dado que operan en buena parte de su tiempo en niveles por encima de los 5 m.

En el caso de embalses pequeños, las alternancias entre niveles menores y mayores a este umbral son más frecuentes, por lo que el ciclo se rompe y se libera la radiación retenida a penas el embalse se vuelve somero. Debido a esta particularidad y para simplificar los cálculos, se toma el valor medio entre los coeficientes correspondientes a verano e invierno, por lo tanto, se fija para profundidades del embalse mayores a 5 m. un  $K_c = 0.95$ . Del mismo modo, para el rango intermedio ( $2 < h < 5$  m.), se precisa el valor promedio entre los otros dos grupos ( $K_c = 1$ ). Finalmente, y aunque los valores son muy cercanos y podría tomarse uno solo sin mayores implicancias, se programa el cálculo para tomar en consideración las diversas situaciones.

Así entonces,  $K_c$  se determina como:

$$K_c = \begin{cases} h < 2 \text{ m} \rightarrow 1.05 \\ 2 < h < 5 \text{ m} \rightarrow 1 \\ h \geq 5 \text{ m} \rightarrow 0.95 \end{cases}$$

### Mecanismo de simulación de balance hídrico en un embalse

Una vez hallados todos los valores de los parámetros antes descritos, y definida el área cultivada, con la cual queda determinada la demanda agrícola total, ya es posible simular la operación del embalse para determinar los caudales ofertados por la represa.

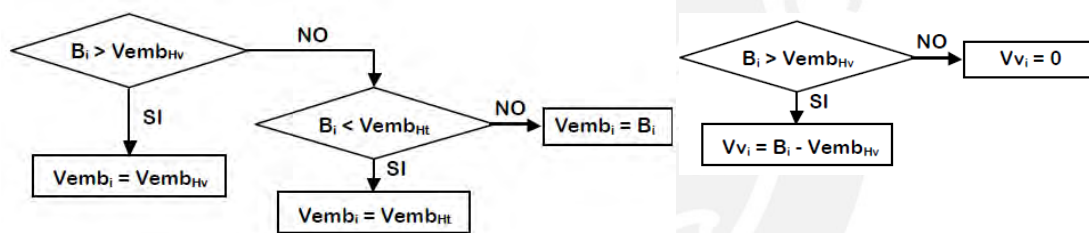
A priori, no es posible determinar el volumen de aporte de la precipitación y la evaporación dentro del embalse, ya que no se dispone de un espejo de agua representativo del mes, por lo que, en primera instancia, se calcula un volumen auxiliar despreciando su diferencia ( $Ev_i - P_i = 0$ ), y suponiendo además que no existe vertido ( $Vv_i = 0$ ) y se satisface la demanda ( $Vr_i = Vd_i$ ). Esto se realiza con el propósito de aproximar el espejo de agua representativo, para luego hallar el volumen bruto en el embalse ahora sí con todas las variables involucradas y con los reajustes respectivos, tal como se sigue a continuación:

$$V_{emb}^{aux} = V_{emb\ i-1} + V_{esc\ i} - V_{d\ i} - V_{s\ i}; \quad V_{emb}^{aux} \Rightarrow A_{emb}^{aux}$$

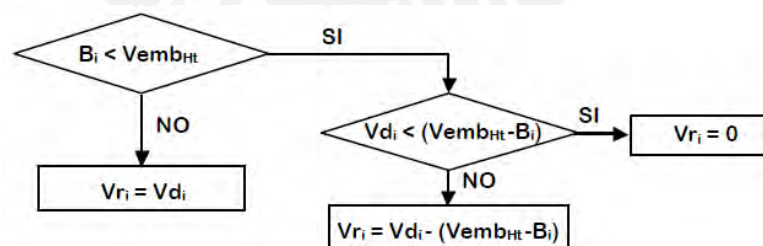
$$A_{emb\ i} = (A_{emb\ i-1} + A_{emb}^{aux}) / 2$$

$$V_{emb\ i} = V_{emb\ i-1} + V_{esc\ i} (Ac - A_{emb\ i}) / Ac + (P_i - Ev_i) A_{emb\ i} - Vd_i - Vs_i$$

No obstante, este volumen bruto  $B_i$  (en el esquema anterior aparece de forma general como  $V_{emb\ i}$ ) debe compararse con la capacidad del embalse, y en caso sea mayor que el volumen máximo, o menor que el mínimo, entonces se hacen las correcciones correspondientes. Si es el caso, también se determina el volumen vertido, según las siguientes relaciones lógicas:



Finalmente, según se haya procedido en los apartados anteriores, se determina el volumen real regado (respecto a la demanda inicial) en el mes analizado, según el siguiente algoritmo:



## Evaluación de la garantía hídrica

Definido el volumen de riego ( $V_{ri}$ ), se realiza un análisis de garantía de la obra al cubrir la demanda ( $V_{di}$ ), expresado mediante su cociente. Esta relación es conocida como el **Índice de Satisfacción de la Demanda (ISD)**:

$$ISD = \frac{\sum V_{ri}}{\sum V_{di}}$$

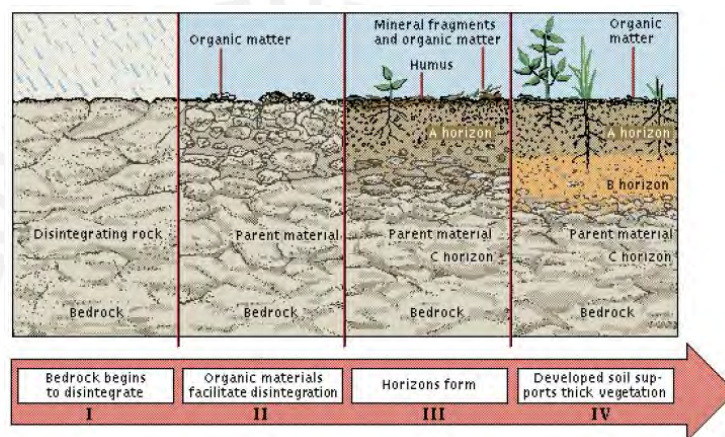
Este índice varía en base a la cota de vertido ( $H_v$ ) y el área regada ( $A_r$ ), por lo que para una mejor elección de los alcances finales del proyecto es conveniente realizar un análisis de sensibilidad alterando porcentualmente dichas variables.

## 2.4 SEDIMENTOLOGÍA EN EMBALSES

### 2.4.1 INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO DE LA EROSIÓN

#### Intemperización

Entre los procesos externos que han moldeado la geomorfología de la Tierra, el concepto más relacionado con la erosión es el fenómeno de intemperización. Es necesario puntualizar este tema para tener un entendimiento más amplio de la dinámica erosiva.



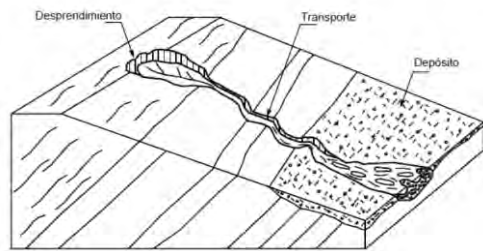
**Figura 2.4-1** Formación del suelo a través de la intemperización (según Cooper, Soil Basics, U. Minnesota, <http://www.soils.umn.edu/academics/classes/soil2125/index.html>)

La mayoría de la superficie seca del planeta está compuesta por materiales no consolidados provenientes de rocas. Aquellas partículas sólidas alcanzaron su estado actual a través de un proceso de interacción química, física y/o biológica denominado intemperización, que consiste en la alteración progresiva de la estructura litológica original, dando como resultado un material particulado (Ritter et al., 2002, citado por García-Chevesich, 2015).

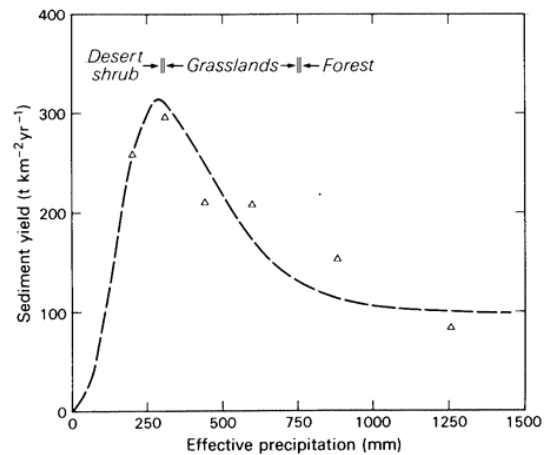
Conforme transcurre el tiempo, las alteraciones producidas por diversos agentes de la naturaleza producen estratos de suelo cada vez mejor diferenciados. En taxonomía se les denomina horizontes, y son clasificados en base a su composición edafológica, en donde el horizonte más superficial (horizonte A) regularmente cuenta con mayor contenido de materia orgánica y los subsiguientes son más mineralizados (fig. 2.4-1).

#### El fenómeno erosivo

La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales sólidos por acción de la fuerza de un fluido en movimiento (fig. 2.4-2). La erosión puede ser generada tanto por el agua como por el viento (Suárez, 2001).



**Figura 2.4-2** Proceso de erosión (Suárez, 2001)



**Figura 2.4-3** Relación entre producción de sedimentos y precipitación anual (Langbein y Schumm, 1958, citados por García-Chevesich, 2015)

### **Erosión hídrica**

Erosión y sedimentación son dos conceptos que se encuentran ligados cuando la causante de la pérdida de suelo es el agua. Existe una relación clara entre la precipitación media anual y las tasas de sedimentación producidas (fig. 2.4-3). La dinámica erosiva inicia en los desiertos (lluvias escasas), en donde mientras más intensa se torna la precipitación, mayor es también el nivel de erosión. Esta relación se mantiene lineal hasta superar el umbral en el que comienza a formarse vegetación, la cual amortigua la caída de la lluvia, con lo cual a partir de este punto de inflexión la erosión unitaria se ve reducida con el aumento de la precipitación, ya que produce a su vez más vegetación.

Por otro lado, típicamente, las tasas más altas de erosión hídrica se concentran en un reducido número de eventos, representados por las grandes tormentas (alto período de retorno). No obstante, en el largo plazo, la mayor proporción de la erosión total sucede debido a los eventos de menor magnitud (bajo período de retorno), los que en cantidad superan el suelo perdido en los eventos más catastróficos (Morgan, 2005).

### **Erosión eólica**

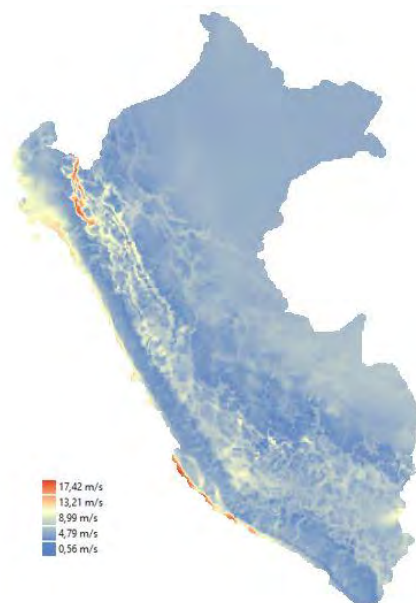
Evidentemente, el factor más importante es la velocidad del viento, la cual se puede asumir como cero a una altura  $z_0$  determinada en función de la rugosidad superficial producida por obstáculos, y que a partir de allí aumenta con la altura en forma exponencial.

Si bien existen métodos relativamente confiables para medir la erosión eólica, las técnicas de medición están mucho menos desarrolladas que las utilizadas en erosión hídrica (Morgan, 2005). No obstante, a fin de tener una idea del orden de magnitud de la velocidad de los vientos, se puede consultar la escala de Beaufort, la cual consta de 13 rangos (cuadro 2.4-1).

Con el fin de evaluar el potencial eólico en el país con fines energéticos, el MINEM publicó en 2016 un atlas eólico que muestra las velocidades del viento en el territorio nacional, medidas a distintas alturas, desde los 10 m hasta los 150 m. (fig. 2.4-4). Para poder medir la influencia local de la fuerza eólica, basta con clasificar dentro del correspondiente rango el valor de la máxima velocidad media del viento esperada.

Calma	0 - 1	Km/h
Ventolina	2 - 6	
Viento suave	7 - 12	
Viento leve	13 - 18	
Viento moderado	19 - 26	
Viento regular	27 - 35	
Viento fuerte	36 - 44	
Viento muy fuerte	45 - 54	
Temporal	55 - 65	
Temporal fuerte	66 - 77	
Temporal muy fuerte	78 - 90	
Tempestad	91 - 104	
Huracán	> 104	

**Cuadro 2.4-1** Escala de Beaufort de la velocidad de los vientos (según Chereque, 1989)



**Figura 2.4-4** Mapa de velocidad media anual del viento a 150 metros de altura (MINEM, 2016)

Este apartado no requiere mayor detalle, debido a que, como se demuestra más adelante, no se desarrollan vientos importantes en la zona de estudio.

## Modelación de la erosión

Existen diversas metodologías desarrolladas para distintos procesos erosivos. Entre las más conocidas y mundialmente utilizadas se encuentran los siguientes:

- Universal Soil Loss Equation (USLE)
- Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
- Water Erosion Prediction Project (WEPP)
- Soil Loss Estimation for Southern Africa (SLEMSA)
- Morgan, Morgan and Finney Model (MMF)
- European Erosion Model (EUROSEM)

Si bien el modelo WEPP es el más reciente e implica una nueva generación de tecnología de predicción de la erosión hídrica, superando limitaciones de variabilidad espacial y temporal en topografía, propiedades y uso del suelo, etc.; requiere información mucho más precisa y, sobre todo, en cantidades considerablemente mayores.

Debido a lo anterior, y dado el alcance trazado, se elige realizar la predicción de la erosión con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), desarrollada por el USDA.

## 2.4.2 MODELO USLE

### La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La pérdida de suelo promedio anual por área unitaria está descrita y cuantificada por la *Universal Soil Loss Equation* – USLE (Wischmeier y Smith, 1978 citado por Morgan, 2005):

$$E = R \times K \times LS \times C \times P$$

donde:

E	=	Pérdida de suelo promedio anual ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )
R	=	Erosividad de la lluvia y escorrentía ( $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )
K	=	Erodabilidad del suelo ( $t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ )
LS	=	Factor de longitud y pendiente de la cuenca ( <i>adimensional</i> )
C	=	Factor del manejo de la cobertura vegetal ( <i>adimensional</i> )
P	=	Factor de prácticas de conservación de suelos ( <i>adimensional</i> )

El modelo no simula la nieve, además, tiende a sobreestimar el aporte de sólidos en el punto de cierre, pues considera que toda la erosión producida en la cuenca contribuye íntegramente, más no toma en cuenta los procesos de sedimentación intermedios.

#### **Factor R – Erosividad de la lluvia y escorrentía**

El factor R -*Rainfall – Runoff Erosivity Factor*- es el parámetro que presenta la mayor incertidumbre de cálculo, ya que debido a la alta variabilidad geográfica de las características precipitacionales, la gran mayoría de ecuaciones desarrolladas solo cuenta con validez regional. Sin embargo, en general los métodos indican que la energía cinética (EC) y la máxima intensidad de lluvia en 30 minutos ( $I_{30}$ ) son proporcionales a R (USDA, 1997).

Una de las fórmulas de validez global con mayor aceptación es la propuesta por Morgan:

$$R = (EC \times P_a \times I_{30})/100$$

**Ecuación 2.4-1** Fórmula de Morgan (Morgan, 2005)

donde:

R	=	Erosividad anual de la lluvia y escorrentía ( $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ )
EC	=	Energía cinética de la lluvia ( $MJ \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ )
$P_a$	=	Precipitación anual promedio (mm)
$I_{30}$	=	Intensidad de lluvia en 30 minutos, para un TR=2 años ( $\text{mm h}^{-1}$ )

Si bien es razonable usar un tiempo de retorno (TR) que caracterice a la media poblacional (50% de recurrencia), en la actualidad existe gran controversia en torno al TR asociado a  $I_{30}$ . Sin embargo, aun así, se adopta el período de retorno de 2 años, debido a su representatividad estadística de la lluvia en el tiempo (USDA, 1997, citado por Mendoza, 2014).

Para poder obtener  $I_{30}$ , se hace uso de las curvas IDF IILA–SENAMHI–UNI, una familia de curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia desarrolladas para las distintas regiones del Perú,

por el convenio de cooperación conformado por el *Instituto Ítalo Latinoamericano -IILA-*, el *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAMHI-*, y la *Universidad Nacional de Ingeniería -UNI-*<sup>5</sup>. En el cap. 3.6.1 se comenta la idoneidad de esta fórmula en la actualidad.

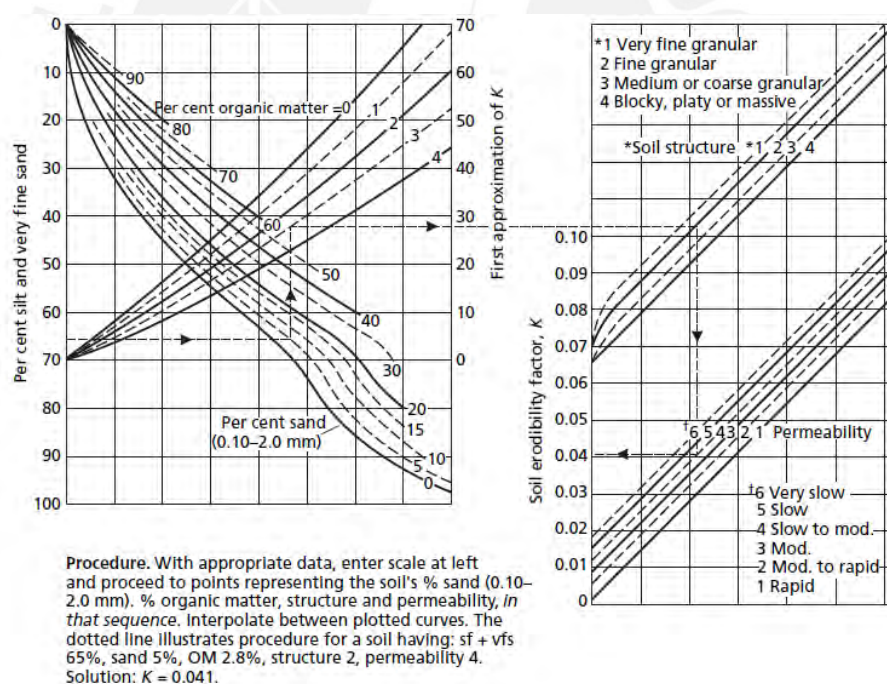
Finalmente, la energía cinética (EC) se relaciona exponencialmente con la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos ( $I_{30}$ ), mediante la expresión propuesta por Van Dijk, la cual cuenta con alta aceptación y consenso sobre su validez global:

$$EC = 0.283(1 - 0.52e^{-0.042 * I_{30}})$$

**Ecuación 2.4-2** Fórmula de Van Dijk (Van Dijk et al., 2002)

### **Factor K – Erodabilidad del suelo**

Los suelos no son iguales en términos de su resistencia a la erosión. La erodabilidad de un suelo está en función de variables como su textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (Morgan, 2005, citado por García-Chevesich, 2015). Estos factores condicionantes son referenciados siempre a los 15-20 cm. superiores del suelo, excepto la permeabilidad que está referida a todo el perfil.



**Figura 2.4-5** Nomograma para calcular la erodabilidad del suelo K en unidades SI (Wischmeier et al. 1971, adaptado por Morgan, 2005)

En específico, la materia orgánica puede mejorar casi todas las propiedades del suelo, pues su presencia aumenta la aireación e infiltración, así como la cohesividad interparticular.

<sup>5</sup> Para un mayor alcance sobre esta metodología revisar Ref. [20].

Asimismo, la capacidad de infiltración está en directa relación con la generación de escurrimiento superficial, responsable de la erosión laminar y otros procesos de erosión hídrica. Por último, es interesante indicar que las partículas medianas son las que más fácil se erosionan, pues tanto las arcillas con su alta cohesión, como las arenas con su alta fricción, resisten mejor, siendo los limos la clase textural más vulnerable (García-Chevesich, 2015).

El nomograma fundamental para determinar la erodabilidad de un suelo (fig. 2.4-5), toma en cuenta todos estos factores (Wischmeier et al. 1971, citado por Morgan, 2005).

No obstante, el nivel de procesamiento es alto, por lo que, para el caso de pequeñas cuencas, se toma el criterio simplificado del *Servicio de Investigación Agrícola (ARS)* del USDA, el cual relaciona el contenido de materia orgánica con características texturales (Stewart et al, 1975, citado por León, 2001), indicando medias estimadas de escalas ampliadas de valores específicos del suelo, especificadas para la determinación de K (cuadro 2.4-2).

Clase de textura	Contenido materia orgánica		
	0,5 %	2 %	4 %
Arena	0,05	0,03	0,02
Arena fina	0,16	0,14	0,10
Arena muy fina	0,42	0,36	0,28
Arena migajosa	0,12	0,10	0,08
Arena fina migajosa	0,24	0,20	0,16
Arena muy fina migajosa	0,44	0,38	0,30
Migajón arenoso	0,27	0,24	0,19
Migajón arenoso fino	0,35	0,30	0,24
Migajón arenoso muy fino	0,47	0,41	0,33
Migajón	0,38	0,34	0,29
Migajón limoso	0,48	0,42	0,33
Limo	0,60	0,52	0,42
Migajón arcilloso arenoso	0,27	0,25	0,21
Migajón arcilloso	0,28	0,25	0,21
Migajón arcilloso limoso	0,37	0,32	0,26
Arcilla arenosa	0,14	0,13	0,12
Arcilla limosa	0,25	0,23	0,19
Arcilla	0,13-0,29		

**Cuadro 2.4-2** Magnitud general del factor K en unidades imperiales. Factor de conversión a SI = 0.1317 (Stewart et al, 1975, citado por León, 2001)

### **Factor C – Manejo de la cobertura vegetal**

Como regla general, mientras más densa y homogénea sea la cubierta vegetal, mayor es su efectividad en la disminución de la erosión laminar (García-Chevesich, 2015).

La vegetación actúa como cubierta protectora, estableciéndose como amortiguador entre el suelo y la atmósfera. Pero su presencia no solo protege el suelo contra la erosión de impacto, sino que también brinda rugosidad al terreno por el que el flujo superficial viaja, reduciendo su velocidad, y, por ende, su poder erosivo. Adicionalmente, las raíces superficiales refuerzan el suelo, tensando y formando conglomerados firmes y difíciles de fragmentar, constituyendo una variable indispensable para el control de la erosión (Morgan, 2005).

Cultivo y Práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobrepastoreada	0.1
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maíz, sorgo, alto rendto., sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo mínimo	0.02 – 0.10
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo con chisel	0.12 – 0.20
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo con chisel	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Soya	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuete	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.8
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001-0.003
Arbolado forestal clareado	0.003-0.009
Arbolado muy clareado (25-60%)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003-0.013
Matorral ralo y eriales	0.20-0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matorjos (100%)	0.003
Plantas herbáceas y matorjos (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15-0.09
Cubierta inapreciable	0.45

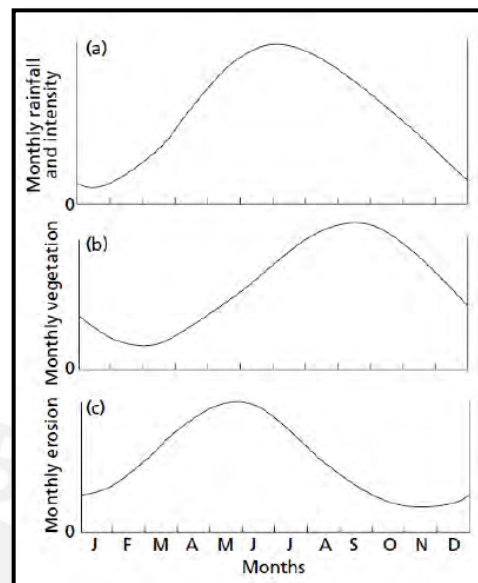


Figura 2.4-6 Ciclos estacionales de lluvia, cobertura vegetal y erosión en un clima semi-húmedo (Kirkby, 1980, citado por Morgan, 2005)

Cuadro 2.4-3 Valores de cobertura vegetal (Wischmeier y Smith, 1978, citados por Portuquez, 2015)

Por estas razones, el factor C (*Cover-Management Factor*) es uno de los agentes más influyentes en la determinación de la erosión, tal como queda evidenciado en la fig. 2.4-6. En el cuadro 2.4-3 se definen los valores del factor C para los tipos más comunes de cultivos y coberturas (Wischmeier y Smith, 1978, citado por Portuquez, 2015).

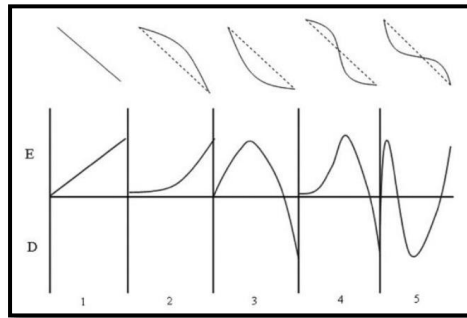
### **Factor LS – Longitud y pendiente de la cuenca**

La longitud de la pendiente (L) se define como la distancia horizontal desde el origen del flujo superficial hasta el punto donde:

- (1) El gradiente de la pendiente disminuye lo suficiente para que la deposición comience, o
- (2) La escorrentía se concentra en un canal definido.

El factor de la inclinación de la pendiente (S) refleja la influencia del gradiente de la pendiente sobre la erosión (Wischmeier y Smith, 1978, citado por USDA, 1997). Estos dos factores son combinados en un índice unificado (*Slope Length and Steepness Factor*) que determina la influencia de la topografía sobre la cantidad y velocidad del escurrimiento superficial que se genera producto de una tormenta.

En la fig. 2.4-7 se ilustran situaciones hipotéticas para las cuales existen variaciones en las tasas de erosión y depositación, a lo largo de cinco tipos de configuraciones de pendiente.



**Figura 2.4-7** Variaciones en las tasas de erosión (E) y depositación (D), según cambios topográficos (Terrence et al., 2002 citado por BREA, 2010)

Grupos de pendientes en %	Factor L.S
0 - 3	0,3
3 - 12	1,5
12 - 18	3,4
18 - 24	5,6
24 - 30	8,7
30 - 60	14,6
60 - 70	20,2
70 - 100	25,2
> 100	28,5

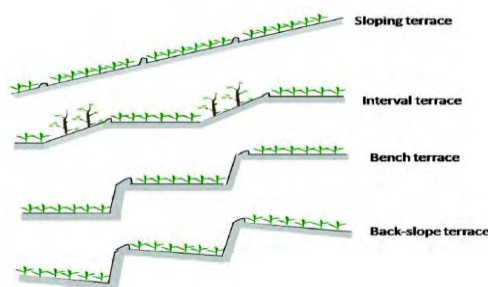
**Cuadro 2.4-4** Valores del Factor LS para diferentes pendientes (López Cadenas de Llano y Blanco, 1968, citados por Portuguez, 2015)

Sin embargo, los nomogramas y las ecuaciones fundamentales para determinar el factor LS (Wischmeier & Smith 1978, citado por USDA, 1997) son complicados de implementar en un entorno de geoprocésamiento GIS, debido principalmente al trabajo en formato ráster (ver cap. 2.5). En la actualidad, el procedimiento se ha complejizado con el desarrollo de algoritmos de cálculo, por lo que para simplificar el cálculo se utiliza el criterio sencillo del *Departamento de Hidráulica e Hidrología de la E.T.S.I. de Montes de la UPM* (cuadro 2.4-4), que permite asignar directamente el valor del factor LS en función de la pendiente de una ladera (López Cadenas de Llano y Blanco, 1968, citados por Portuguez, 2015).

### **Factor P – Prácticas de conservación de suelos**

Este parámetro recoge el efecto que tienen las diferentes prácticas de conservación de suelos en las pérdidas por erosión (León, 2001). Se pueden mencionar la siembra en curvas de nivel, y el cultivo en fajas o terrazas (fig. 2.4-8). Estas prácticas afectan a la erosión modificando el patrón de flujo, el grado o la dirección del escurrimiento superficial, y reduciendo la cantidad y tasa de escorrentía (Renard y Foster, 1983 citados por USDA, 1997).

Ya que el estudio va enfocado hacia cuencas altoandinas naturales, no existen prácticas de conservación de suelos que afecten la erosión, por lo que por definición el factor P vale 1.



**Figura 2.4-8** Representación esquemática de cuatro tipos de terraza (Guo & Li, 2014)

Clases de erosión	Pérdida de suelos (t/ha/año)
Nula a ligera	menor a 10
moderada	10 – 50
Alta	50 – 200
Muy alta	mayor a 200

**Cuadro 2.4-5** Escala de pérdida de suelo (FAO-PNUMA-UNESCO, 1981 citado por Portuguez, 2015)

Finalmente, mediante análisis geoespacial, se procede a la superposición de los mapas elaborados con los factores R, K, LS y C, y así finalmente se calcula la pérdida total de suelos en la cuenca de estudio. En el cuadro 2.4-5 se muestra una escala de valores en t/ha/año para poder desarrollar una idea general del orden de magnitud del monto total de erosión.

## Coeficiente de Entrega de Sedimentos (CES)

La USLE permite calcular fundamentalmente la cantidad de suelo erosionado, pero no da información en cuanto a su posible tránsito dentro de la cuenca, donde es susceptible de ser depositado, ya que no todo el sedimento producido por la erosión superficial ingresa a la red hidrográfica y es transportado por los cursos de agua (Martínez, 2010, citado por Mendoza, 2014). Debido a esta situación, el procedimiento debe asumir que el aporte de sedimentos (AS) al embalse es solo una fracción del total de sedimentos erosionados en el área fuente (TE).

El coeficiente de entrega de sedimentos (CES) surge para ajustar la erosión total estimada y compensarla por la deposición intermedia de sedimentos, para así, finalmente, estimar el aporte de sedimentos en un punto específico de la cuenca.

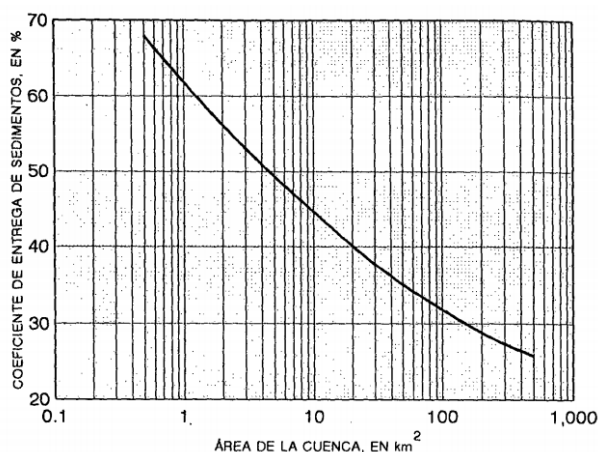
Estos conceptos se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$AS = TE * CES$$

donde:

- AS = Aporte neto de Sedimentos de una cuenca [ton/ha/año]
- TE = Erosión potencial bruta de la cuenca fuente, estimada por USLE [ton/ha/año]
- CES = Coeficiente de entrega de sedimento [%]

El valor del CES depende de la distancia del área de análisis al cuerpo principal de agua. Mientras más alejadas se encuentren las zonas de producción de sedimentos de los cursos de agua, menor será el CES; asimismo, su valor es disminuido en grandes áreas de drenaje, suelos de textura gruesa y topografía suave (Hairston, 2001, citado por Mendoza, 2014).



**Figura 2.4-9** Variación del coeficiente de entrega de sedimentos (CES) respecto al tamaño de la cuenca (ASCE, 2000, adecuado por Gracia, 1997)

Su predicción se realiza mediante ecuaciones desarrolladas para relacionar las características de la cuenca con la estimación de la erosión total. Entre los criterios simplificados con mayor aceptación, la ASCE propone el uso del ábaco de la fig. 2.4-9 para evaluar el CES.

### 2.4.3 VOLUMEN MUERTO DE EMBALSES

#### Capacidad de retención de sedimentos del reservorio

El sedimento se deposita en el embalse en una proporción diferente según sean las características del sedimento, las reglas de operación, y la relación entre la descarga natural de la esorrentía de la cuenca y el volumen del embalse.

El porcentaje del sedimento que ingresa y es retenido en el reservorio, se conoce como *Eficiencia de atrape*  $\eta_A$ . Este parámetro se estima básicamente a partir de relaciones empíricas, siendo el criterio de Brown el que mejor se adapta a reservorios situados en cabeceras de cuenca (Butcher et al., 1993, citado por Bodoque et al., 2001).

$$\eta_A = 1 - \frac{1}{1 + K * (2.1 * 10^3) * \left(\frac{V}{A}\right)}$$

**Ecuación 2.4-3** Fórmula de Brown (Brown, 1943, citado por Bodoque et al., 2001)

siendo:

$\eta_A$  = Eficiencia de atrape ; A = Área de la cuenca [km<sup>2</sup>]

V = Capacidad volumétrica total del embalse [MM<sup>3</sup>]

K = Coeficiente del efecto de las reglas de operación del embalse. Puede tomar valores entre 0.046 y 1, dependiendo de la frecuencia de vaciado y el tipo de sedimento. Para diseño se suele usar un valor característico de 0.10.

Por lo tanto, si un embalse retiene el agua por varios meses tendrá más sedimentación que otro que en pocos días descarga, asimismo, aquel que sea pequeño en comparación con la magnitud de la esorrentía anual dejará pasar gran parte del sedimento, mientras que uno con capacidad relativamente significativa tendrá una alta eficiencia de atrape (Fatorelli, 2011).

#### Grado de compactación del sedimento depositado

En la mayor parte de los embalses, el fenómeno de compactación de sedimentos hace disminuir el volumen depositado después de cierto tiempo (Gracia, 1997). Este efecto se considera, determinando su densidad final para el período de vida útil de la represa, el cual se fija en 50 años para análisis técnico – económicos de pequeñas presas (Bureau of Reclamation, 2007).

La densidad de las partículas depositadas en un embalse está en función de tres factores principales: a) las reglas de operación del embalse; b) la textura y composición de los sedimentos; c) el grado de compactación de los mismos a través del tiempo. El último depende principalmente del tipo de sedimento: la grava y la arena normalmente se compactan en muy corto tiempo, en tanto que las arcillas requieren de períodos muy largos para consolidarse.

## El criterio de Miller

Esta versión simplificada de la ecuación de Lane y Koelzer permite calcular la compactación del sedimento en el transcurso del tiempo (se determina para la vida útil de la represa). En la actualidad, este criterio se sigue manteniendo como el de mayor consenso (Sánchez, 2014):

$$\delta_t = \delta_o + 0.4343 * K * \left[ \frac{t}{t-1} * \ln t - 1 \right]$$

**Ecuación 2.4-4** Fórmula de Miller (Miller, 1953, citado por Sánchez, 2014)

siendo:

$\delta_t$  = Peso específico de los sedimentos después de t años de compactación [kg/m<sup>3</sup>]

$\delta_o$  = Peso específico inicial, es decir, al final del primer año (cuadro 2.4-6) [kg/m<sup>3</sup>]

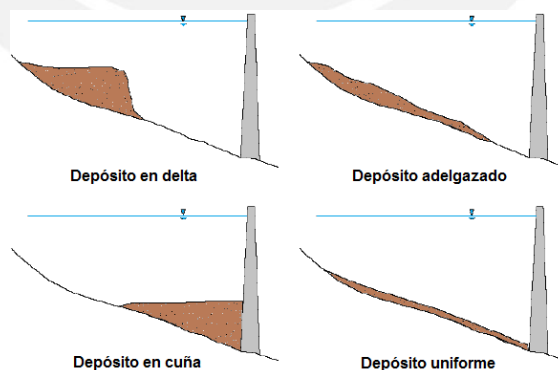
K = Factor de compactación que depende de las reglas de operación del embalse, y del tamaño y textura del sedimento (cuadro 2.4-6)

Operación del Embalse	Arena		Limo		Arcilla	
	$\delta_o$	K	$\delta_o$	K	$\delta_o$	K
Embalses con sedimento siempre sumergido	1450	0	1050	91	344	256
Embalses con descensos normales o moderados	1450	0	1240	29	848	134
Embalses normalmente vacíos	1450	0	130	0	1250	0

**Cuadro 2.4-6** Pesos específicos iniciales y factores de compactación del sedimento para el criterio de Miller (Miller, 1953, citado por Sánchez, 2014)

Cabe realizar dos acotaciones: (1) el tipo de material está definido por el sistema USDA, y (2) cuando se presentan distintos materiales,  $\delta_o$  y K se obtienen mediante promedios ponderados.

## **Distribución del sedimento dentro del embalse**



**Figura 2.4-10** Esquemas básicos del depósito de sedimentos en embalses (modificado de Moreno, 2012, citado por Sánchez, 2014)

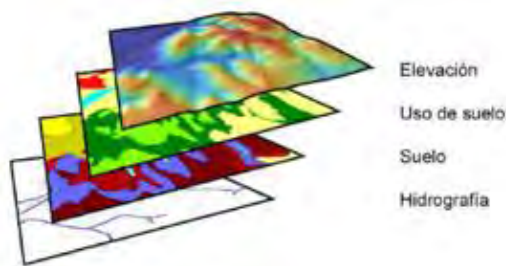
Tal como fue comentado en el cap. 1.1.2, no es factible ejecutar procedimientos de remoción de sedimentos de alta eficiencia en pequeñas presas. En este contexto, es fundamental determinar la ubicación del sedimento dentro del embalse, ya que permite definir las zonas del vaso donde se tendrá una disminución de capacidad. Esta parte del embalse que durante la vida

útil se colmata de sedimentos se conoce como *volumen muerto*, y no se tiene en cuenta en la capacidad útil usada en la simulación de la operación del embalse.

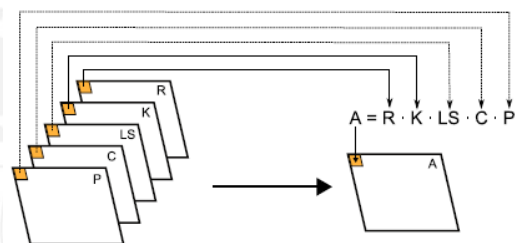
La forma de distribución del material sólido en un embalse depende principalmente del tipo de sedimento, las reglas de operación y las características del vaso y las avenidas. Según la clasificación de Morris y Fan (fig. 2.4-10), se presentan cuatro esquemas típicos de depósitos de sedimentos. En específico, los depósitos en cuña son característicos de embalses pequeños, y están formados por materiales gruesos constituidos a pie de presa, que se van haciendo más finos hacia aguas arriba (Morris y Fan, 1997, citados por Sánchez, 2014).

## 2.5 FUNDAMENTOS DE SOFTWARE DE INGENIERÍA

### 2.5.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN HIDROLOGÍA



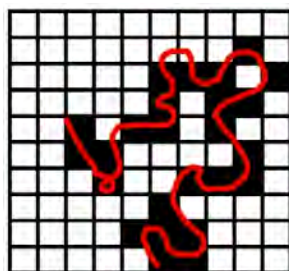
**Figura 2.5-1** Concepto de capa de información geográfica dentro de un GIS (Olaya, 2014)



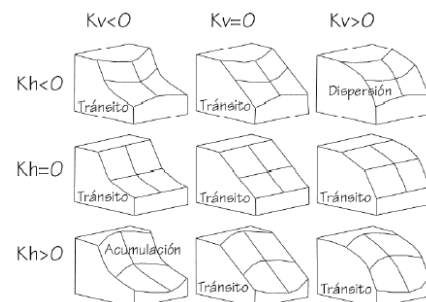
**Figura 2.5-2** Extensión de la fórmula de la USLE para la combinación de conjunto de capas GIS (Olaya, 2014)

Un *Sistema de Información Geográfica* –GIS, en inglés– es un sistema que mediante la integración de tecnología informática con información geográfica, tiene la principal función de capturar, almacenar, analizar, procesar y representar datos georreferenciados (Olaya, 2014).

Un GIS representa la información mediante dos formatos, el vectorial, con formas definidas como líneas, puntos o polígonos; y el ráster, con una grilla estructurada de celdas con valores de la variable medida (fig. 2.5-3). Mediante la combinación de diversas capas (fig. 2.5-1) se pueden obtener nuevas capas unificadas con nuevos parámetros – resultado, tal como en la adecuación GIS del método USLE (fig. 2.5-2), modelo visto en el capítulo anterior.



**Figura 2.5-3** Representación vectorial -línea roja- vs ráster -cuadros negros- (Olaya, 2014)



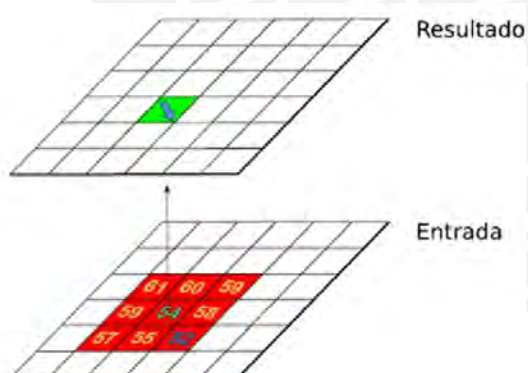
**Figura 2.5-4** Procesos de acumulación según valores de curvaturas horizontal y vertical (Olaya, 2014)

## Conceptos de geomorfometría y análisis del terreno

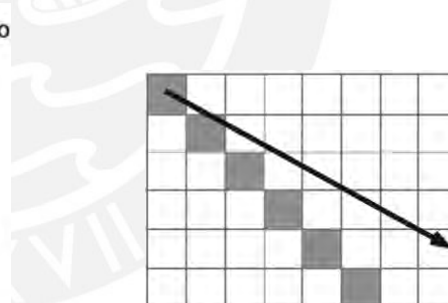
En un esquema típico de procesamiento de ingeniería hidrológica aplicada a obras hidráulicas un GIS concentra especial utilidad en los apartados de obtención de parámetros morfológicos, mediante el geoprocésamiento y la geoestadística aplicada a los *Modelos Digitales del Elevaciones* (MDE), de acuerdo a modelos hidrológicos previamente definidos.

El MDE es la capa de información fundamental desde la cual pueden extraerse múltiples parámetros hidrológicos. El formato ráster debido a su malla regular, la cual brinda una estructura más ordenada y sistemática, es la mejor opción para ejecutar el geoprocésamiento, sin embargo, previamente la capa debe ser saneada de problemas de convergencia numérica para que los resultados derivados sean correctos, en especial, en los casos de zonas llanas o con depresiones que producen errores con los algoritmos utilizados.

El análisis de un MDE mediante el uso de funciones focales (que dependen matemáticamente de sus celdas contiguas) se puede llevar a cabo mediante parámetros estadísticos (media, varianza, etc.) y geométricos. Los segundos requieren de una caracterización matemática del relieve topográfico para poder aplicar herramientas de cálculo diferencial. Los parámetros basados en derivadas de primer orden son la pendiente y la orientación, y los basados en derivadas de segundo grado son las curvaturas, horizontal y vertical, que definen procesos físicos de acumulación, dispersión y tránsito hidrológico (fig. 2.5-4).



**Figura 2.5-5** Función de asignación de dirección de flujo. En rojo, celdas analizadas. En verde, la celda que recoge la dirección resultante (modificada de Olaya, 2014)



**Figura 2.5-6** Propagación de errores de dirección en el modelo D8. La flecha señala la dirección real y las celdas sombreadas, la dirección calculada (Olaya, 2014)

Dentro de este análisis hidrológico, el **algoritmo D8** constituye la base conceptual de gran parte de los métodos que existen para la asignación de direcciones de flujo. Este modelo compara los valores de elevación de una celda central con las situadas en su entorno para así determinar la dirección del flujo hacia la celda contigua con menor cota (fig. 2.5-5). No obstante, debido al procesamiento en formato ráster, existe una pérdida de precisión respecto a la realidad física que se va minimizando con el uso de algoritmos complejos (fig. 2.5-6).

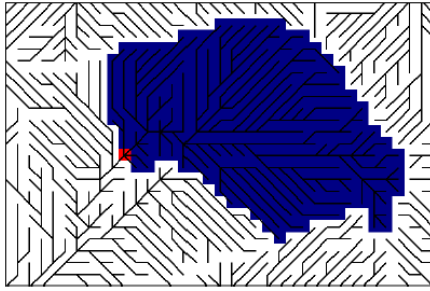


Figura 2.5-7 El área acumulada de una cuenca con el Modelo D8 (Olaya, 2014)

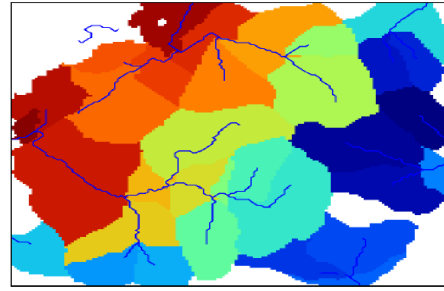


Figura 2.5-8 División de una cuenca en múltiples subcuencas (Olaya, 2014)

Lo anterior permite establecer relaciones entre las celdas y proceder así a un estudio regional. A esta escala la medida principal es el área aportante, la cual se emplea como parámetro auxiliar para la extracción de las redes de drenaje de la cuenca (fig. 2.5-7).

La combinación variada de parámetros, en especial de los mapas de pendientes y área aportante, conduce a la delimitación (fig. 2.5-8) y caracterización de cuencas vertientes, así como a índices hidrológicos de gran interés.

### Rutinas de cálculo hidrológico en Arc Hydro Tools

Esta extensión contiene un conjunto de herramientas creado para desarrollar de forma rápida en ArcGIS los geoprocесamientos necesarios para llevar a cabo las simulaciones hidrológicas.

Usando el MDE como insumo, el geoprocесamiento del terreno recopila una serie de subrutinas que son ejecutadas en secuencia y que describen colectivamente el patrón de drenaje, además de conducir a la demarcación de subcuencas y cauces.

Por etapas diferenciadas, los comandos son los siguientes:

$\frac{\textit{Corrección del terreno}}{\textit{(Pre - Procesado del MDE)}} =$	<ul style="list-style-type: none"> <li>[ Rellenado de depresiones – <b>Fill Sinks</b> –</li> </ul>
$\frac{\textit{Delimitación de cauces}}{\textit{(Procesado general del MDE)}} =$	<ul style="list-style-type: none"> <li>[ Dirección del flujo – <b>Flow Direction</b> –</li> <li>Acumulación de flujo – <b>Flow Accumulation</b> –</li> <li>Definición de cauces – <b>Stream Definition</b> –</li> <li>Segmentación de cauces</li> <li>–<b>Stream Segmentation</b> –</li> <li>Vectorización de líneas de drenaje</li> <li>–<b>Drainage Line Processing</b> –</li> </ul>
$\frac{\textit{Delimitación de subcuencas}}{\textit{(Procesado general del MDE)}} =$	<ul style="list-style-type: none"> <li>[ Demarcación de subcuencas</li> <li>–<b>Catchment Grid Delineation</b> –</li> <li>Vectorización de polígonos de cuencas</li> <li>–<b>Catchment Polygon Processing</b> –</li> <li>Agregación de subcuencas adyacentes</li> <li>–<b>Adjoint Catchment Processing</b> –</li> </ul>
$\frac{\textit{Definición de cuenca de interés}}{\textit{(Procesado localizado del MDE)}} =$	<ul style="list-style-type: none"> <li>[ Marcado interactivo del punto de salida</li> <li>(y delimitación de la cuenca hidrográfica)</li> <li>–<b>Point Delineation</b> –</li> </ul>

Finalmente, se procede al recorte de todas las capas con la máscara del perímetro de la cuenca obtenida en el último paso. En caso la cuenca sea muy grande también es posible sectorizar en varias subcuencas. Para el caso de pequeñas cuencas, basta con los pasos mencionados para desarrollar el caso de estudio.

Todo este proceso es esquematizado por el constructor de modelos de ArcGIS, *Model Builder*, el cual compila esta serie de rutinas en un solo algoritmo de cálculo, permitiendo la automatización del análisis morfométrico (Collado & Navarro, 2013).

## 2.5.2 MODELAMIENTO NUMÉRICO DE FILTRACIONES EN PRESAS

Un modelo numérico es una simulación matemática de un proceso físico real, un intento de expresar la comprensión del proceso (el modelo conceptual) en términos matemáticos.

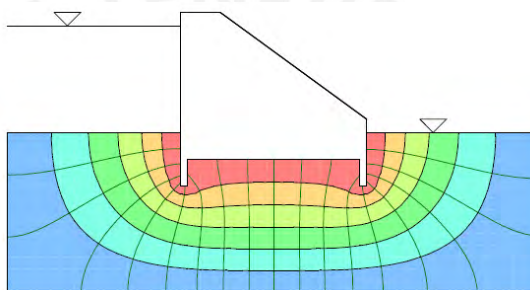


Figura 2.5-9 Red de flujo por debajo de una presa de concreto (GEO-SLOPE International Ltd., 2012)

Los métodos numéricos de elementos finitos se basan en el concepto de subdividir un medio continuo en pequeños fragmentos, describiendo las acciones de las piezas individuales y luego reconectándolas para representar el comportamiento del sistema. Estas piezas se conocen como elementos finitos, y el proceso de subdivisión, como discretización o mallado.

SEEP/W es un modelo numérico que puede simular el proceso físico real del agua que fluye a través de un medio poroso, siguiendo la formulación de la ley de Darcy, por lo que es ampliamente utilizado en ingeniería para cuantificar las filtraciones (fig. 2.5-9) y describir su comportamiento (redes de flujo) a través de distintos tipos de presas y sus cimientos.

### Tipos de materiales

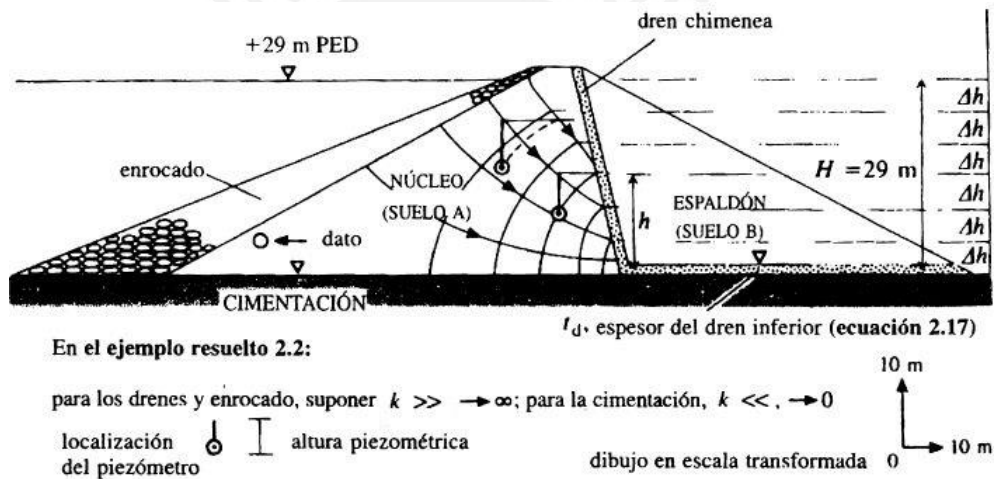
Son cuatro los materiales usados por SEEP/W en base a su comportamiento hidrogeológico:

- Modelo completamente saturado: solo se aplica en el caso que se tenga la total certeza de que el estrato asignado se encontrará por completo sumergido, por debajo de la superficie freática. Básicamente, solo es necesario el dato de la conductividad hidráulica saturada.
- Modelo saturado/no saturado: cuando existe duda respecto al régimen hidrogeológico del estrato, o si se sabe con anticipación que se encontrará parcialmente sumergido, entonces es necesario utilizar este modelo, en donde se debe definir una función de conductividad hidráulica que varíe con la humedad y el grado de succión del estrato.

- c) *Modelo de interface*: son elementos lineales usados para representar objetos de espesor despreciable. En el caso de redes de flujo, se usa para modelar geosintéticos.
- d) *Ninguno*: se usa para definir zonas en donde se elige no simular el flujo, debido a que el estrato no contribuye a la disipación de la carga hidráulica, y, por lo tanto, su definición no aporta a la solución, sino más bien ralentiza el procesador.

En el caso del modelo saturado/no saturado, es especialmente complicado determinar de manera precisa la función de conductividad hidráulica, dado que se requieren costosos ensayos de campo o laboratorio para medirla directamente. Debido a esta situación, se utilizan funciones aproximadas de acuerdo al tipo de suelo simulado que SEEP/W tiene en su base de datos. Si bien esto último no es lo óptimo, los resultados son más realistas que los obtenidos simulando el estrato como totalmente saturado (GEO-SLOPE International Ltd, 2012).

### Condiciones de contorno y mallado



**Figura 2.5-10** Conceptualización del esquema numérico hidrogeológico para flujo a través de presas zonificadas de materiales sueltos (Novak et Al., 2001)

Las dos condiciones de contorno de interés son las de carga hidráulica total (altura de posición más altura de presión), y la de carga de presión cero, en donde internamente SEEP/W asigna una carga total correspondiente a la altura de posición del elemento. A modo ilustrativo, en la fig. 2.5-10 se muestra la conceptualización típica que se sigue para la modelización numérica de las filtraciones en una presa zonificada. Como se observa, en aras de definir condiciones de frontera que propicien un modelo ligero, pero eficaz, se aprovecha la gran diferencia de las conductividades hidráulicas entre el núcleo y su interacción con el material granular permeable y los cimientos de roca madre, para poder idealizar a los últimos como estratos con carga de presión cero (totalmente permeable) y flujo cero (totalmente impermeable), respectivamente.

Por otro lado, la opción de *cuadrángulos & triángulos* como elementos base para la construcción del mallado es la más usual y la más optimizada. El tamaño de malla puede ser distinto en cada estrato, y es posible definir discretizaciones focalizadas.

### 3 CASO DE ESTUDIO: PROYECTO PRESA CHAMPACCOCHA

#### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto fue desarrollado como una versión optimizada de diversos estudios previos que fueron destinados a darle viabilidad al embalsamiento con represa en la cerrada de la laguna Champacocha (cap. 1.2). Por lo tanto, se procede al análisis en el emplazamiento ya elegido, donde se cuenta con información de ensayos de campo y topografía de detalle.

#### Ubicación y acceso

El proyecto está situado en la cordillera central occidental de los Andes peruanos. Políticamente está ubicado en el distrito de Vilcanchos, departamento de Ayacucho (fig. 3.1-1). En la división grillada de la geología del Perú realizada por el INGEMMET, la cuenca pertenece al sector I del cuadrángulo de Paras de la carta geológica nacional (fig. 3.1-2).



Figura 3.1-1 Ubicación geográfica de la cuenca Champacocha (elab. propia)

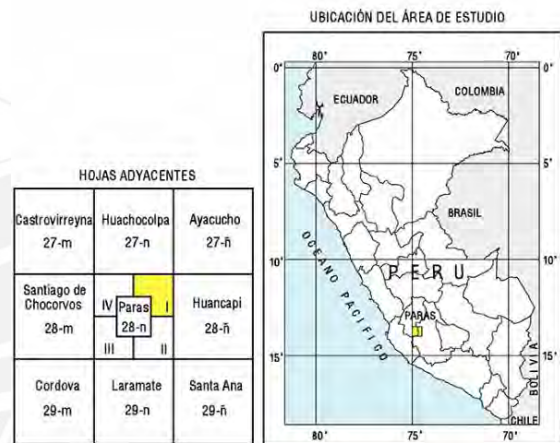


Figura 3.1-2 Cuadrángulo de Paras, hoja 28n-I de la carta geológica nacional (INGEMMET, 1994)

La ubicación en coordenadas UTM es aproximadamente 8491139 S y 544232 E (zona 18S), y geográficamente se ubica en los 13°38'15" latitud Sur y 74°36'44" de longitud Oeste.

#### Generalidades

El proyecto consiste en represar la escorrentía producida por la microcuenca Champacocha para poder abastecer el riego de las áreas agrícolas de los cuatro pueblos aledaños: Espite, San Jacinto, San Miguel y Vilcanchos (fig. 3.1-3). En principio, estas cuatro zonas implican una superficie total regada de 534 Ha.



**Figura 3.1-3** Proyecto en GIS del sistema de abastecimiento de riego (elab. propia)

### Identificación del área de estudio

En el emplazamiento se encuentra la laguna Champacocha (imagen 3.1-1), la cual evidencia un nivel freático superficial en la parte baja topográfica de la cuenca. En la parte alta de la quebrada Champacocha se observan zonas rocosas con escasa vegetación, en contraparte de las cuencas media y baja (cercana a la laguna), en donde se identifican extensas zonas de estepas y vegetación de baja altura.



**Imagen 3.1-1** Punto de cierre de la Cuenca Champacocha (imagen propia)



**Imagen 3.1-2** Repesamiento rudimentario con material granular y rocas de tamaño mediano (imagen propia)

En décadas pasadas, la población lugareña construyó una pequeña presa “artesanal” de tierra (imagen 3.1-2) para represar el volumen de la laguna, por lo que durante muchos años las inmediaciones aguas arriba de la presa existente han recibido los aportes de sedimentos transportados por los eventos de precipitación que han transcurrido en todo este tiempo. Esta situación generó un estrato aluvial levemente consolidado que a simple inspección visual se concluye que muy probablemente no constituye una capa adecuada para la cimentación de la presa proyectada, y posiblemente tendrá que ser removido de la zona de actuación.

## 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

La quebrada Champacocha se ubica en la zona altoandina, por lo que su orografía es abrupta (imagen 3.1-1) y su clima es significativamente variable en sus estaciones.

### 3.2.1 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

#### Procesamiento Geoespacial

La determinación de las características morfométricas de la cuenca se realiza con algoritmos de geoprocésamiento GIS. Antes de realizar estas rutinas de cálculo, primero se prepara el archivo fuente, para lo cual mediante el software AutoCAD Civil 3D se generan *Redes Irregulares de Triángulos (TIN)* a partir de las curvas de nivel regionales obtenidas desde la carta nacional (1:100,000) y del levantamiento topográfico de detalle que se realizó en la zona del embalse proyectado (1:2,000). Por último, se unifican ambos TIN y la superficie final se convierte a formato ráster para obtener el MDE acotado a las inmediaciones de la cuenca.

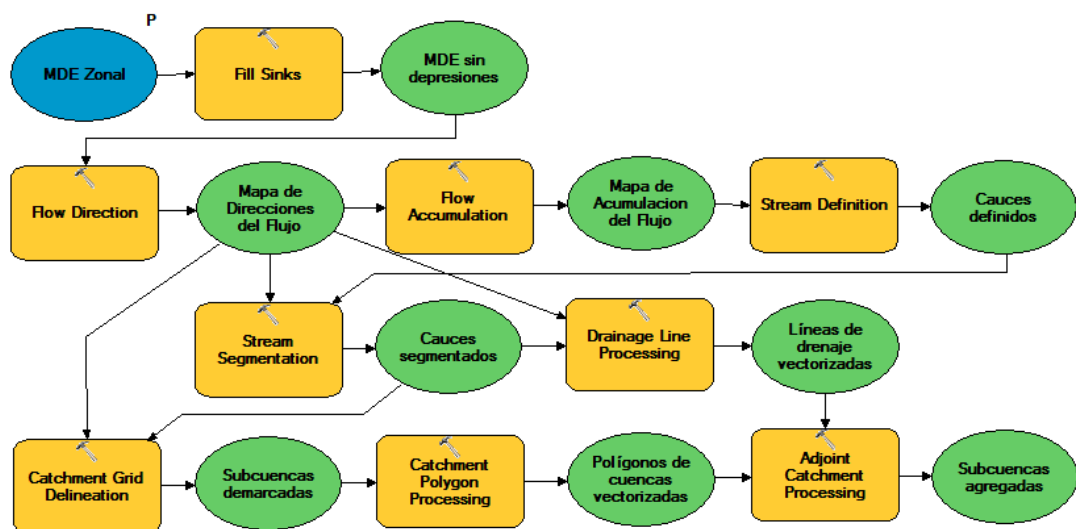
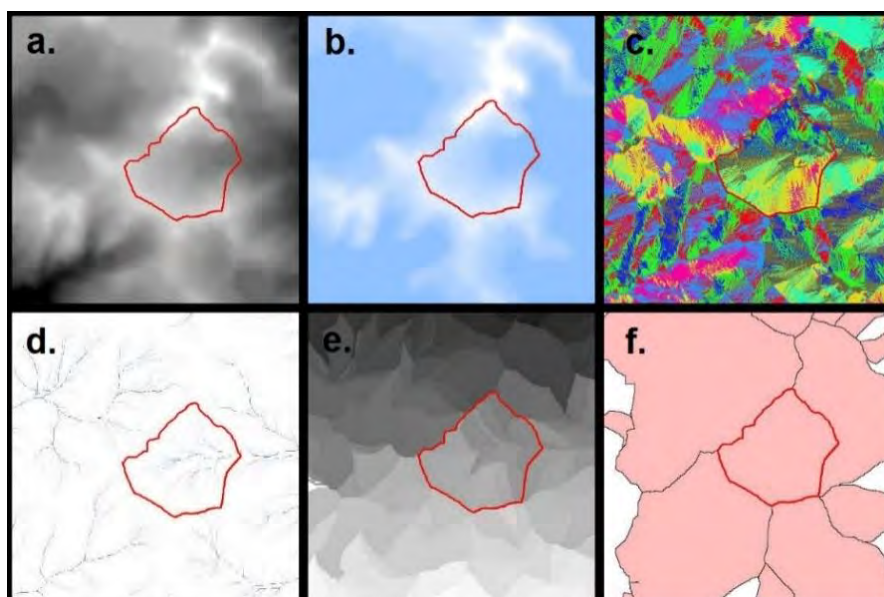


Figura 3.2-1 Algoritmo unificado de Arc Hydro Tools creado en Model Builder (elab. propia)

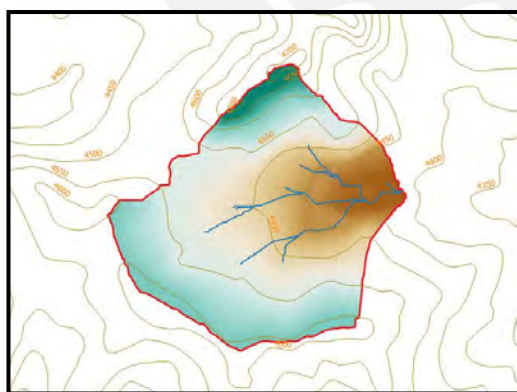
Posteriormente, con el software ArcGIS se realiza el geoprocésamiento del total del MDE creando en *Model Builder* un algoritmo unificado de cálculo para análisis hidrológicos con *Arc Hydro Tools* (fig. 3.2-1).

Para concluir, se ejecuta por separado el “Marcado interactivo del punto de salida”, y así se delimita la cuenca Champacocha y se obtiene la red de drenaje, además de los mapas fisiográficos intermedios (fig. 3.2-2), mencionados en el cap. 2.5.1.

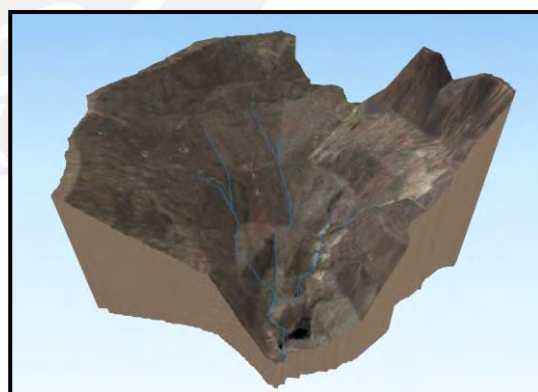


**Figura 3.2-2** Mapas generados desde Arc Hydro Tools superpuestos con la cuenca Champacocha  
a) MDE original, b) MDE corregido sin depresiones, c) Direcciones del flujo, d) Acumulación del flujo, e) Demarcación de subcuencas, y f) Agregación de subcuencas (elab. propia)

Los archivos se exportan a QGIS para su representación (fig. 3.2-3), en donde además se genera un modelo pseudo 3D de la cuenca ya demarcada, superpuesto con una máscara de *Google Satellite* para una mejor visualización del objeto de estudio (fig. 3.2-4).



**Figura 3.2-3** MDE de la microcuenca superpuesto con curvas de nivel y red de drenaje (elab. propia)



**Figura 3.2-4** Visualización pseudo 3D de la microcuenca en QGIS (elab. propia)

## Cálculo de parámetros geomorfológicos

Se determinan, mediante consulta GIS, las características físicas de la cuenca identificada, tales como: área de la cuenca, longitud de cauce, pendiente, entre otros (tabla 3.2-1).

MORFOMETRÍA	INFORMACIÓN REQUERIDA	UND	VALOR
CUENCA	Área	Km <sup>2</sup>	2.69
	Perímetro	Km	8.64
	Kc (Coef. Gravelius)	---	1.49
	Pend. Cuenca	%	18.9%
	Altitud media Cuenca	msnm	4530
CAUCES	Long. Cauce Principal	km	2.41
	Cota Mayor	msnm	4600
	Cota Menor	msnm	4413
	Pend. Cauce Principal	%	7.76%
	Densidad de drenaje	km/km <sup>2</sup>	1.71

Tabla 3.2-1 Parámetros morfométricos de la cuenca Champacocha (elab. propia)

## Curva hipsométrica

Las curvas hipsométricas representan la relación entre la altitud y el área acumulada a cada elevación. Realizado el cálculo tabulado (ver anexo IV), se crea la curva hipsométrica de la cuenca (gráfico 3.2-1/ fig. 3.2-5), y desde esta se calcula que la altura media es 4532 msnm.

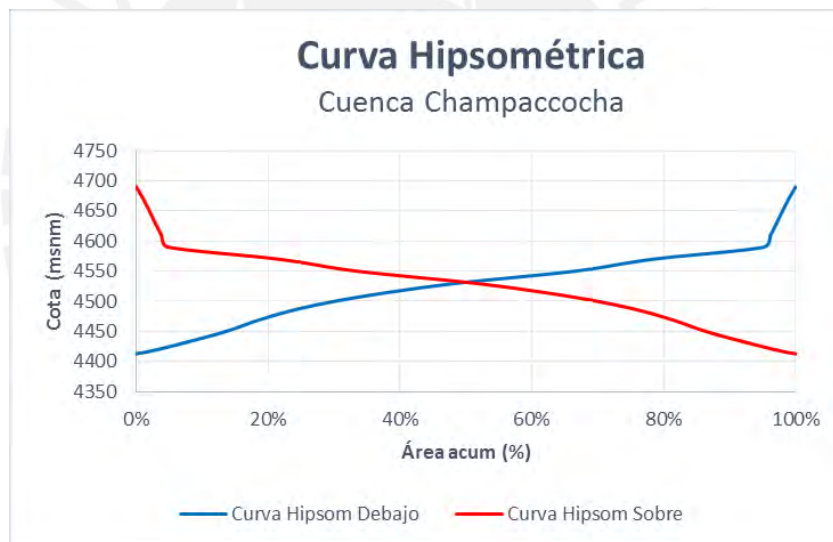


Gráfico 3.2-1 Curva hipsométrica de la cuenca Champacocha (elab. propia)

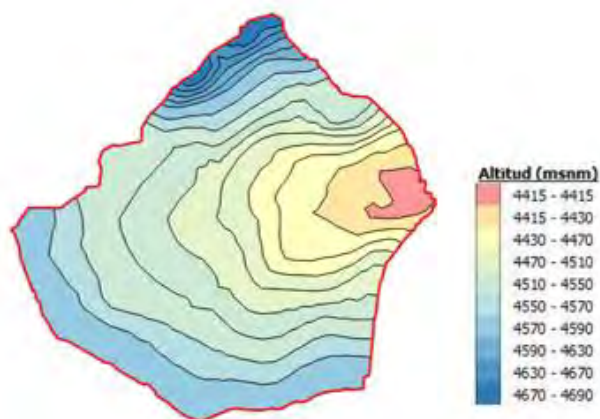


Figura 3.2-5 Clasificación por rango de elevaciones de la cuenca (elab. propia)

### 3.2.2 BIO-CLIMATOLOGÍA, HIDROGRAFÍA Y GEOLOGÍA

Dado que la zona de estudio se encuentra en cabecera de cuenca, una caracterización precisa es inmensamente más importante y esencial, ya que no existe información para calibrar.

#### Bio-Climatología

Según el *Mapa Ecológico Del Perú*<sup>6</sup>, que establece la distribución geográfica de *Zonas de Vida* basadas en el sistema de clasificación del Dr. Leslie R. Holdridge, el área de estudio pertenece a la categoría de “Páramo muy húmedo Subalpino Subtropical”.

En esta categoría la temperatura media anual varía entre 6.9 a 4.6 C°, la precipitación total anual promedio, entre 1,088.5 y 513.4 mm., y se ubica en el tipo de provincia de humedad denominado *PerHúmedo*. La configuración topográfica está definida por áreas con laderas de moderado a fuerte pendiente hasta presentar afloramientos rocosos. Por otro lado, los suelos son relativamente profundos, generalmente con influencia volcánica (Andosols), y el escenario vegetal está constituido por una abundante mezcla de gramíneas y otros pastos naturales.

#### Hidrografía

El otrora INRENA, siguiendo la metodología Pfafstetter para la delimitación, codificación y clasificación de cuencas hidrográficas, elaboró el mapa actual de cuencas hidrográficas del Perú (INRENA, 2005, citado por ANA, 2012). Según esta clasificación, el área de estudio es parte de la red hidrográfica de la quebrada Chapccara, en la cuenca norte del río Pampas, y según la demarcación administrativa realizada por la *Autoridad Nacional del Agua (ANA)*, pertenece a la *Autoridad Local del Agua (ALA)* de Bajo Apurímac – Pampas (fig. 3.2-6).



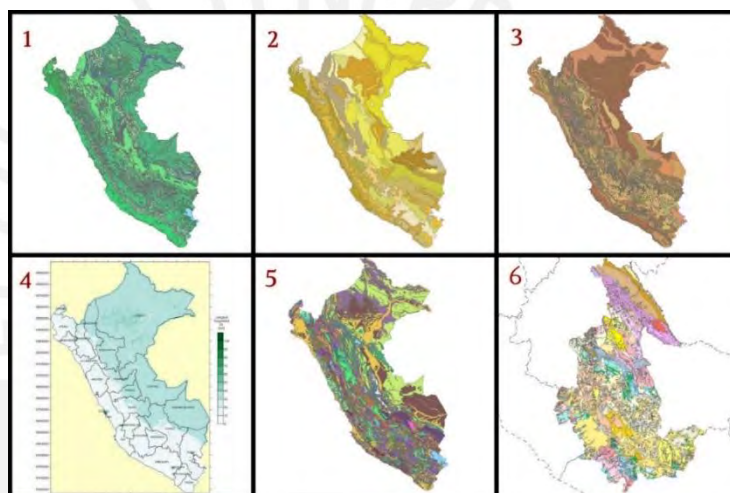
Figura 3.2-6 Ubicación de Cuenca Champaccocha respecto de las grandes cuencas hidrográficas regionales (elab. propia)

<sup>6</sup> Ver Ref. [31]

## Geología y cobertura superficial

Los resultados de la caracterización de los estratos se contrastan con fotografías tomadas en campo en la zona de la laguna, y con imágenes satelitales en planta del área de estudio, descargadas en alta resolución mediante el aplicativo *SAS-Planet* (ver anexo I). Estos dos elementos auxiliares se utilizan para comprobar y evaluar los resultados obtenidos.

Siguiendo con el procedimiento, desde los *Web Map Service* (WPS) del INGEMMET, MINAGRI y del MINAM se obtuvo acceso a diversas capas correspondientes a geología, uso del suelo, fisiografía, entre otros (fig. 3.2-7), las cuales fueron revisadas en línea desde ArcGIS, con el fin de seguir caracterizando de forma más específica la zona de actuación. Finalmente, se descartaron mapas con información redundante y/o de poca utilidad, y solo se emplearon cinco (5) mapas nacionales y un (1) mapa departamental<sup>7</sup>:



**Figura 3.2-7** Mapas nacionales. 1. Cobertura vegetal (Fuente: MINAM) 2. Clase de suelo FAO (Fuente: ONERN) 3. Ecología – zonas de vida (Fuente: ONERN) 4. Rugosidad superficial (Fuente: MINEM) 5. Geología nacional (Fuente: INGEMMET) 6. Geología de Ayacucho (Fuente: MINEM)

## Zonas de vida ecológica

El *Mapa Ecológico Del Perú* se usa para poder caracterizar la cuenca como la Zona de Vida “Páramo muy húmedo Subalpino Subtropical”, que se vio en el apartado de bioclimatología.

## Geología

Dado el mayor nivel de discretización del mapa (1:50,000), la cuenca presenta diversas capas geológicas en su superficie. Un nivel de extensión amplio (fig. 3.2-8) es ideal para una mejor comprensión de la historia geológica de la zona, que ultima en un mejor entendimiento de su estratigrafía, sin embargo, para poder caracterizar la geología superficial de la cuenca, es necesario discretizar el espacio de trabajo para un análisis más focalizado (fig. 3.2-9).

---

<sup>7</sup> Todos los mapas se pueden revisar con mayor detalle en el anexo III.



**Figura 3.2-8** Distribución referencial de la geología regional en los alrededores de la cuenca de estudio (elab. propia)



**Figura 3.2-9** Distribución geológica superficial en la cuenca Champaccocha (elab. propia)

En la leyenda de la carta geológica nacional 28n-I, los símbolos son clasificados respecto a su edad y formación geológica, y presentan breves descripciones. La identificación de los estratos se hizo sobre la imagen de la leyenda del archivo original escaneado del MINEM (por esto la escala multicromática no es la misma que en el mapa acotado en GIS), y se presenta en el cuadro 3.2-1 (Np-po/s está con la nomenclatura Np-ms/tbl).

Para la descripción de los estratos, dado que la memoria descriptiva de Paras no contiene un inventario completo de todos sus componentes, fue necesario apoyarse en los sectores adyacentes Huachocolpa y Arequipa para completar la caracterización.

A continuación se describen las capas superficiales asociadas, por orden de edad geológica:

### **Js-Ia: Formación Labra**

La formación Labra es una de las cinco formaciones geológicas del Grupo Yura, tiene un espesor medio de aprox. 800 m. y es una unidad de amplitud regional que se extiende desde el sur de Arequipa hasta el suroeste de Ayacucho y sur de Huancavelica, encontrándose en los bordes de la cuenca estratos volcánicos. Presenta una secuencia litológica bastante variable, predominando las areniscas cuarcíticas y las cuarcitas (Vargas, 1970).

En general, se puede decir que a grosso modo **la Formación Labra es una arenisca cuarzosa**, una roca sedimentaria de tipo detrítico casi impermeable.

### **Nm-ca: Formación Caudalosa, Miembros Inferior (i) y Medio (m)**

El volcanismo explosivo del *Grupo Huachocolpa* se manifiesta en varias etapas, entre ellas las *Formaciones Caudalosa y Portuguesa*. Se define como *Fm. Caudalosa* a un conjunto de rocas volcánicas, esencialmente lavas andesíticas y flujos de brechas (Morche et al., 1996).

Mediante el diagrama TAS *-Total Alkali Silica-* (que permite definir una roca volcánica); y el diagrama  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  (para clasificación de Andesitas), se determina que el 40% de las muestras analizadas son Andesitas, y el 60% restante, Andesitas Basálticas.

LEYENDA						
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS			
C E N O Z O I C O	CUATERNARIO	Holocena	Dep. Botedales  Qh-bo Limoarcillas con material orgánico negro			
			Dep. Aluviales recientes  Qh-al2 Arenas y limoarcillas semiconsolidadas			
			Dep. aluviales antiguos  Qh-al1 Gravas, arenas y limoarcillas semiconsolidadas			
		Pleistocena	Dep. de Morrenas  Qpl-mo Clastos y bloques en una matriz limo-arenosa inconsolidada			
		NEOGENO	Pliocena	Fm. Astobamba  Np-an/ap Centro volcánico Antasello; andesitas porfíricas		
				N-as Lavas andesíticas gris-oscuro. Mantos y coladas subhorizontales		
			Fm. Portuguesa Mb. Superior  Np-ms/tbl Tobs riolíticas cristalólicas de feldespato y biotitas			
			Mb. Superior  Nm-ca_s Lavas afaníticas andesíticas en coladas muy erosionadas			
	Miocena		Fm. Caudalosa Mb. Medio  Nm-ca_m Lavas andesíticas oscuras, brechas y tobas			
			Mb. Inferior  Nm-ca_i Lavas porfíricas andesíticas muy alteradas. Presencia de brechas			
	PALEOGENO	Oligocena		Brechas de mtz. calc. y volcá. Niveles de tobas soldadas. Toba de cristales grises y lavas porfíricas Toba cristalólicas rosasea y blanca con areniscas tobáceas.		
		Eocena	Fm. Castrovirreyna Mb. Superior  PN-c_s			
			Mb. Inferior  PN-c_j	Toba cristalólica blanca, lava porfírica verde y arenisca tobácea verde blanca Areniscas y limoarcillas rojas, calizas intercaladas con toba crema		
		Paleocena	Fm. Casapalca  KP-c/eed	Areniscas y limoarcillas rojo oscuras		
		MESOZOICA	CRETÁCEO	Superior	Fm. Arcuquina - Murco  Kp-ar-mu	Calizas micríticas cremas pardas masivas. Areniscas rojas a la base
				Inferior	Fm. Hualhuani  Ki-hu	Arenisca cuarzosa blanca
	JURÁSICO		Superior	Fm. Gramadal  Js-gr	Calizas micríticas parda y negra con interestr. de areniscas	
				Fm. Labra  Js-la	Areniscas cuarz. feldosp. blanca a blanca rojizas con interest. de limoarc.	
Medio			Fm. Chunumayo  Jm-ch	Calizas micríticas laminares y areniscas calcáreas. Calizas con betumen		
	Inferior		Fm. Cercapuquilo  Jm-ce	Arenisca cuarzosa blanca, calizas y limoarcillas rojas		
TRIÁSICO	Gpo. Pucara  Tri-pu	Caliza micríticas negra con vetillas de calita interestratificado con limoarcillas rojas y negras. Fósiles				
PALEOZOICA	DEVONICO	Gpo. Mitu  PsT-mi/ar	Brechas volcánicas, areniscas y limoarcillas rojas			
		Fm. Cabanillas  D-ca	Filitas, esquistos arcillosos-arenosos, esquistos cuarzosos y esquistos micáceos, pizarras y abundantes niveles de areniscas cuarzosas grises			

Cuadro 3.2-1 Descripción y clasificación de capas geológicas en la carta 28n-I (INGEMMET, 1994)

Sin embargo, en la descripción localizada de la leyenda de la carta geológica, no se menciona en ningún momento presencia de basalto. Por lo tanto, se decide que la **Formación Caudalosa es Andesita**; roca ígnea volcánica con textura hipocristalina.

### **Np-po/s: Formación Portuguesa, Miembro Superior**

Se describe como *Fm. Portuguesa* a las rocas volcánicas cuya litología está constituida por brechas andesíticas y dacíticas en las unidades inferiores; y domos riolíticos en las unidades superiores (Morche et al., 1996). Su espesor oscila entre 20 - 50 m.

Nuevamente, mediante diagrama TAS y diagrama K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub>, se determina que el 67% de las muestras analizadas son Dacitas, mientras que las Andesitas y las Riolitas se dividen en proporciones iguales el 33% restante. Sin embargo, la descripción litológica en la leyenda detalla tobas riolíticas de feldespatos, aunque también contiene biotitas, minerales propios de las andesitas, y, por lo tanto, de las dacitas, ya que estas últimas son rocas de formación intermedia entre las dos anteriores (Bureau of Reclamation, 2007).

Por otro lado, dado que esta zona presenta vegetación escasa, es muy notorio el cambio que sufre el entorno hacia un tono gris oscuro cuando se acerca a los depósitos piroclásticos de la *Fm. Portuguesa*, tal como se ve en las fotos de campo (imagen 3.1-1) y la imagen satelital (imagen 3.2-1). Esto induce a considerar rocas de composición céntrica, ya que la Riolita es la roca ígnea más clara (cuadro 3.2-2). En consecuencia, se opta por la opción intermedia típica del miembro superior, es decir, se decide que la **Formación Portuguesa es Riodacita**.

COLOR	CLARO				OSCURO				PRINCIPALMENTE PIROXENO Y/O OLIVINO	TIPOS ESPECIALES	
	CUARZO > 10 %	< 10 %	> 10 %	< 10 %	> 10 %	< 10 %	> 10 %	< 10 %			
FELDESPATO	POTASIO FELDESPATO > 2/3 FELDESPATO TOTAL		POTASIO FELDESPATO 1/3- 2/3 FELDESPATO TOTAL		PLAGIOCLASA > 2/3 FELDESPATO TOTAL		PLAGIOCLASA > 2/3 FELDESPATO TOTAL				
PRINCIPAL COMPLEMENTO MINERAL	HORNBLENDA BIOTITA MUSCOVITA		HORNBLENDA BIOTITA PIROXENO		K-SAP > 10% TOTAL		PLAGIOCLASA SÓDICA		PLAGIOCLASA CALCICA	SERPENTINA MINERAL DE HIERRO	
EQUIGRANULAR Blastos, lepidos, texturas, grandes blastos, diques gruesos y suspechos	GRANITO	SIENITA	CUARZO MONZONITA	MONZONITA	GRANDIDERITA	CUARZO DIORITA	DIORITA	GRABBO	PERIDOTITA	PEGMATITA - Grano muy grosso, normalmente silíceo, roca (o pequeña masa irregular)	
MASA DE GRANO MOLIDO DE FINO A GRUESO. Lasolitas diques, suspechos, trapezoidales redes, masas o varios masas	GRANITO PORFIDO	SIENITA PORFIDO	CUARZO MONZONITA PORFIDO	MONZONITA PORFIDO	GRANDIDERITA PORFIDO	CUARZO DIORITA PORFIDO	DIORITA PORFIDO	GRABBO PORFIDO	PERIDOTITA PORFIDO	APLELITA - Roca de grano fino con textura azucarada. LAMPROPHYTE - Roca oscura con alto porcentaje de minerales FeMg como fenocristales en grandes masas.	
APMANITIC MASA MOLIDA Diques, suspechos, trapezoidales, superficie del flujo, masas, rocas soldadas	RIOLITA PORFIDO	TRAQUITA PORFIDO	CUARZO LATITE PORFIDO	LATITE PORFIDO	DACITE PORFIDO		ANDESITA PORFIDO	BASALTO PORFIDO	RARO	* TRAP - color oscuro aplanado roca * FELSITE - color claro aplanado roca	
MICROCRISTALINO Diques, suspechos, superficie del flujo, masas, rocas soldadas	RIOLITA	TRAQUITA	CUARZO LATITE	LATITE	DACITE		ANDESITA	BASALTO			
CRISTALINO Superficie de flujo masas, rocas soldadas	ORISIDIANA - Color oscuro FELDSPATOS - Resaca PIROXENO - Porfido BIOTITA - Partículas conestrías PIEDRA POMEZ - Color laminado, finamente vesicular LACCARIA - Color oscuro, gruesamente vesicular	Normalmente no es posible determinar la composición de estas rocas. Habitualmente se designan por los nombres de la leyenda. Ciertos básicos es raro para nombrar piedras, excepto escoria, normalmente serán silíceos. Si puede determinarse la composición aproximada (por asociación estrecha), se puede perfilar el nombre por el nombre de la apropiada aplanada roca, por ejemplo, "trachyte obsidiana" ó "latita vitrophyre". En general, escoria es básico; obsidiana básica se llama "trachyte", y epiclastite trachyte es "variolite".									* Estos dos términos poco definidos y generalmente no se usan.

Cuadro 3.2-2 Tabla de clasificación de rocas ígneas (Bureau of Reclamation, 2007)

### Q-al: Depósitos Aluviales Recientes

Son depósitos cuaternarios constituidos por los materiales arrastrados por la escorrentía y depositados en su trayecto formando lechos, terrazas y llanuras de capas delgadas. Los materiales aluviales están constituidos por cantos, arena y cascajo (Palacios, 1994).

Debido a la formación reciente de este estrato, y a que básicamente su denominación describe de forma bastante explícita su composición, no es necesario otorgar una descripción geológica para este material mixto semiconsolidado.

### Clase de suelo FAO

Este mapa contiene información que define el tipo de suelo según el sistema de clasificación de suelos de la FAO<sup>8</sup>. Al identificar el área de estudio, el 100% de la cuenca cae dentro de la denominación “Leptosol dístico - Andosol úmbrico - Afloramiento lítico”:

**Leptosols:** Incluye los litosoles (se ve en bioclimatología). Son suelos jóvenes muy delgados sobre roca continua, y que son extremadamente ricos en fragmentos gruesos (pedregosos, menos de 20% de finos). Los Leptosols conforman el *Grupo de Suelos de Referencia (GSR)* más extenso sobre la tierra y son particularmente comunes en regiones montañosas.

<sup>8</sup> Ver Ref. [34]

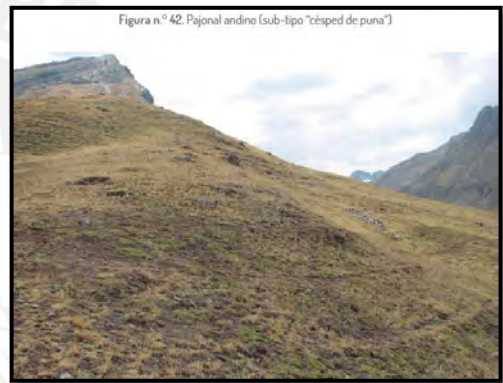
**Andosols:** Son suelos porosos de origen volcánico de color oscuro (se corrobora lo expuesto en bioclimatología). Usualmente, se desarrollan en eyecciones volcánicas ricas en vidrio, pero también se pueden desarrollar en otros materiales ricos en silicato bajo meteorización ácida en climas húmedos y perhúmedos (FAO IUSS Working Group WRB., 2015).

La denominación *úmbrico* hace referencia a un horizonte que se describe como un “suelo grueso, de color oscuro, de moderado a alto contenido de materia orgánica”.

Este escenario edafológico se correlaciona muy bien con el apartado geológico: estratos de origen volcánico (*Fm. Portuguesa y Caudalosa*), y el afloramiento rocoso (*Fm. Labra*) con su correspondiente leptosol superficial. Finalmente, aunque no aparece en la edafología regional, los depósitos aluviales pertenecen a los *Fluvisols*<sup>9</sup>.



**Imagen 3.2-1** Imagen satelital de la cuenca Champaccocha en SAS PLANET (elab. propia)



**Imagen 3.2-2** Foto referencial del “césped de puna” que aparece en la memoria descriptiva del Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015)

### **Longitud de rugosidad superficial $Z_o$ (cm)**

Otro de los productos que se liberaron con el Atlas eólico del Perú<sup>10</sup> (MINEM, 2016) es el mapa de rugosidades, que mide la longitud de rugosidad superficial  $Z_o$ . Usando la consulta espacial en GIS, se determina que la cuenca tiene un  $Z_o$  promedio de 0.11 m.

### **Cobertura vegetal**

Según la revisión de la cuenca en este mapa, la totalidad de la zona de actuación es clasificada como “Pajonal Andino”. En la memoria descriptiva del *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal* (MINAM, 2015) se detalla que esta vegetación está conformada mayormente por herbazales ubicados en la parte superior de la cordillera de los andes, aproximadamente entre 3800 y 4800 msnm (coincide con ubicación y rango de elevaciones del proyecto).

<sup>9</sup> Se infiere a partir de Ref. [34], por caer en la acepción de sedimentos aluviales y lacustres.

<sup>10</sup> Revisar Erosión eólica del cap. 2.4.

En esta gran unidad de cobertura vegetal se registran tres subclases: a. *Césped*, hierbas de hasta de 15 cm de alto; b. *Pajonal*, hierbas de hasta 80 cm; y c. *Tolar*: arbustos de hasta 1,20 m. (Flores et al., 2005, citado por MINAM, 2015). No obstante, por el apartado anterior, se sabe que la cuenca tiene una cobertura de 0.11 m de altura promedio, por lo que es evidente que la subclase específica es *césped*. Además, en la imagen de referencia de este ejemplar que aparece en el documento (imagen 3.2-2) se puede verificar su enorme parecido a los pastos andinos fotografiados en la zona de estudio.

El denominado “césped de puna”, con alturas de hasta 15 cm, está dominado por gramíneas y graminoides (coincide con lo visto en bioclimatología).

### 3.2.3 ANÁLISIS GEOFÍSICO Y ESTRATIGRÁFICO

Mediante el análisis de la geología regional, se pueden deducir los perfiles estratigráficos de la zona de estudio, sin embargo, en esta sección se presenta información obtenida desde métodos de ingeniería de exploración, por lo cual los datos producidos son mucho más precisos. Se inicia presentando los métodos indirectos geofísicos<sup>11</sup>.

#### Prospección geofísica – Método de Refracción Sísmica

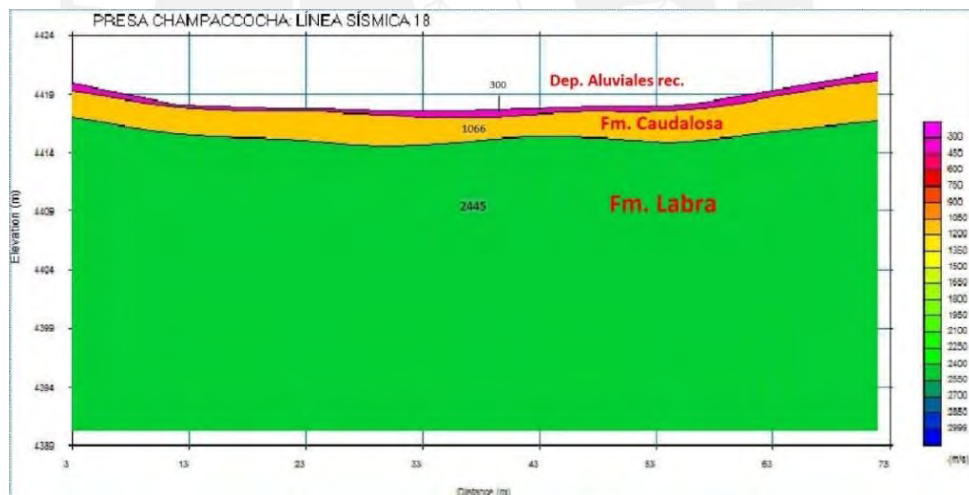


Figura 3.2-10 Perfil típico geo-sísmico de la zona del vaso del embalse (Romero, 2016)

Se realizaron 20 líneas sísmicas de refracción con el fin de conocer de manera específica los estratos en el sector del vaso, donde se proyecta la cimentación de la presa Champaccocha.

Para cada una de las líneas sísmicas se estableció un perfil estratigráfico con valores de velocidad de propagación de ondas longitudinales, basándose en las dromocrónicas calculadas de los tiempos de llegada de las ondas P.

<sup>11</sup> Para más información sobre métodos sísmicos se recomienda revisar Ref. [14] y [24]

En la fig. 3.2-10 se generó un modelo geo-sísmico de tres estratos, el cual se correlaciona con los estratos tipificados en el apartado de geología, y se subdivide en la siguiente secuencia:

Estrato	Onda longitudinales		Espesor capa (m)
	Vp (m/s)	Valoración	
Superior	300	Baja	0.00 - 2.00
Intermedio	560 - 1217	Moderadas medias	1.00 - 5.50
Inferior	1923 - 2620	Elevada	> 40 - ∞

**Tabla 3.2-2** Resumen de parámetros representativos de estratos según geofísica (elab. propia)

Las velocidades de onda longitudinales (Vp) fluctúan entre rangos específicos dependiendo del tipo de estrato que atraviesan, por lo que es necesario comparar estos rangos con escalas de velocidades tipificadas (cuadro 3.2-3), y así poder deducir el tipo de estrato analizado.

Descripción	Velocidad V <sub>p</sub>	
	pie/s	m/s
Suelo intemperizado	800 a 2000	240 a 610
Grava o arena seca	1500 a 3000	460 a 915
Arena saturada	4000 a 6000	1220 a 1830
Arcilla saturada	3000 a 9000	910 a 2750
Agua	4700 a 5500	1430 a 1665
Agua de mar	4800 a 5000	1460 a 1525
Arenisca	6000 a 13000	1830 a 3960
Esquisto, arcilla esquistosa	9000 a 14000	2750 a 4270
Tiza	6000 a 13000	1830 a 3960
Caliza	7000 a 20000	2134 a 6100
Granito	15000 a 19000	4575 a 5800
Roca metamórfica	10000 a 23000	3050 a 7000

**Cuadro 3.2-3** Valores promedios de Vp, según la norma ASTM-D5777 (ASTM, 2011)

El primer y último estrato caen sin problema dentro de los rangos esperados de “*Suelo intemperizado*” y “*Arenisca*”, que, como es evidente, corresponden a las capas de Depósitos Aluviales Recientes y Arenisca cuarzosa, determinadas previamente. Sin embargo, el segundo estrato, que previamente fue establecido como Andesita, está muy por debajo de los umbrales inferiores de los rangos de rocas, aunque también se encuentra por encima de los valores correspondientes a suelos granulares. Esta situación evidencia que la roca no es sana.

Continuando con el análisis, cabe señalar que por inferencia geológica, las líneas de refracción sísmica cortan ambos miembros de la Fm. Caudalosa, produciendo resultados igualmente dispersos en el rango antes indicado, sin embargo, debido a su explícita descripción en la leyenda de la carta geológica, el grado de alteración del miembro inferior se asume mayor.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los resultados geofísicos, ahora se considera el Miembro Medio (Nm-ca\_m) como Andesita fracturada y alterada, mientras que el Miembro Inferior (Nm-ca\_i) recibe la denominación de Andesita muy fracturada y alterada.

## Análisis estratigráfico

Desafortunadamente, no se cuenta con información de sondeos geológicos dentro de la cuenca, pero se han obtenido datos de las calicatas realizadas para el estudio de suelos de los canales proyectados (fig. 3.2-11), excavadas hasta encontrar roca (fig. 3.2-12). Desde este registro se selecciona la calicata más cercana al proyecto de cada una de las zonas principales que conforman la cuenca, excepto en la *Fm. Portuguesa*, donde no se ejecutaron calicatas<sup>12</sup>.

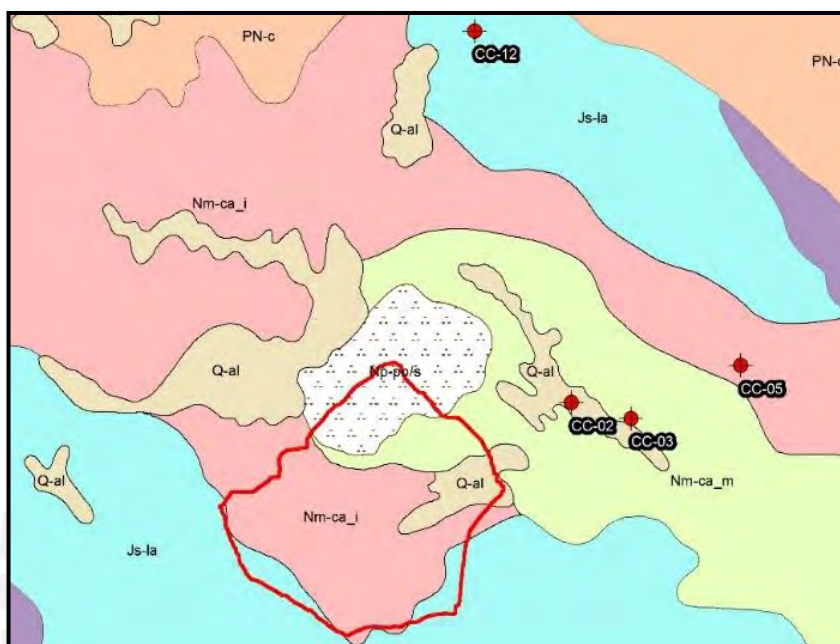


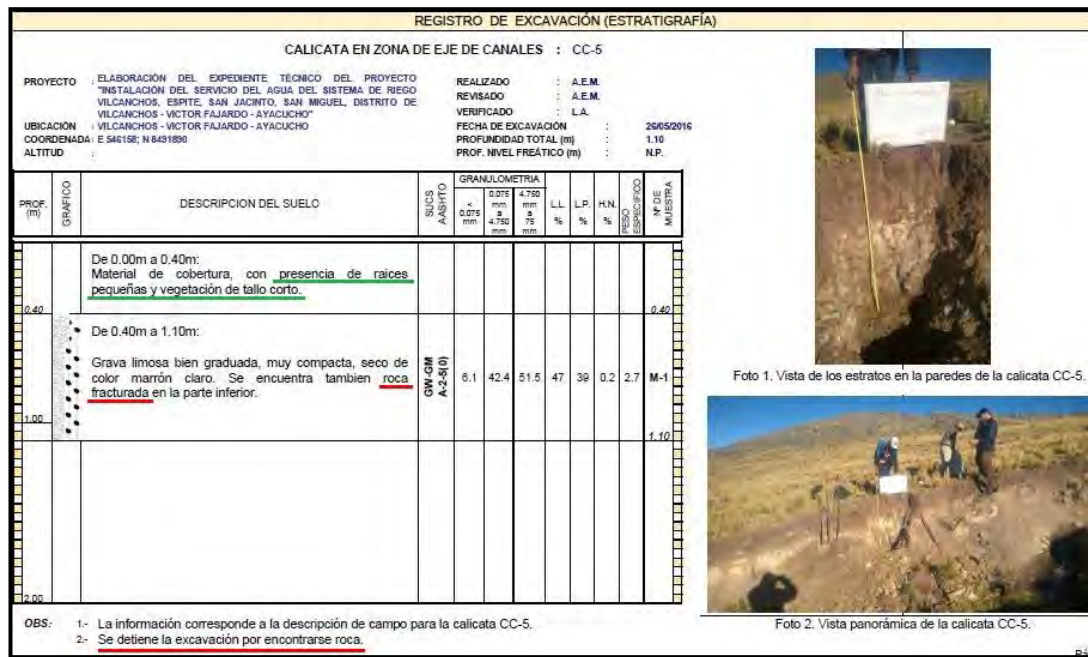
Figura 3.2-11 Ubicación de las cuatro calicatas obtenidas (elab. propia)

En los perfiles estratigráficos de las calicatas elegidas (CC-2, CC-3, CC-5 y CC-12) se aprecia que la caracterización geotécnica (SUCS y otros ensayos) se realiza a partir del segundo estrato, dado que la capa orgánica superficial no es relevante para la ingeniería de cimentaciones, dado su pésimo comportamiento como suelo de fundación.

Como se explica en el cap. 2.4, mientras mayor sea el grado de desarrollo del perfil, los estratos comienzan a presentar características cada vez más diferenciadas. En el caso de las calicatas analizadas, se observa que los perfiles no se encuentran totalmente desarrollados, pero sí presentan un nivel de intemperización intermedio, lo que implica que si bien las propiedades de las dos primeras capas superficiales pueden ser similares, la composición del estrato inorgánico no es totalmente representativa de la capa superior. En este contexto, no es posible usar la granulometría de las calicatas para representar los estratos superficiales con fines de cálculo de la erosión (cap. 2.4) o de determinación de parámetros del modelo de Témez (cap. 2.2). Por esta razón, se optó por utilizar los métodos alternativos ya explicados en cada acápite.

---

<sup>12</sup> Ver Ref. [47]



**Figura 3.2-12** Ficha descriptiva de perfil estratigráfico típico (Municipalidad de Vilcanchos, 2011)

Sin embargo, en base a las clases de suelo descritas en el acápite edafológico, se obtienen valores típicos de las proporciones de arena, limo y arcilla, así como el porcentaje de materia orgánica (%MO) del estrato orgánico *-top soil-*, usando la tabla anexa del mapa mundial de suelos (FAO, 2007), creado en base a la clasificación edafológica FAO del 2006, por lo que algunos calificativos de suelos varían con respecto a la versión actual (2015). En esta versión, los *Leptosols* están representados por los *Litosols*, y el estrato aluvial se asimila mejor al subgrupo de los *Fluvisols districos*. En el caso del suelo correspondiente a la *Fm. Caudalosa*, el subgrupo más cercano al horizonte úmbrico que aparece en esta versión, es el de los *Andosols móllicos*. Por otro lado, dada su composición de roca inferior, la mayor probabilidad está en que la capa superior de la *Fm. Portuguesa* pertenezca al subgrupo de *Andosols vítricos* (su bajo %MO explica la escasa cobertura vegetal que se observa).

Sin embargo, siendo estos datos generalizaciones de propiedades de suelo a nivel mundial, deben validarse de alguna forma con información de campo, por lo que se contrasta la clase textural determinada con la deducida desde las calicatas, dado que se asume que las dos capas superficiales son por lo menos similares, esperando que el estrato vegetal presente una composición ligeramente más fina que el inorgánico.

Por consiguiente, se realiza la comparación de las clases texturales en cada capa principal (tabla 3.2-3), excepto en la *Fm. Portuguesa* donde no hay calicata. Finalmente, se observa que en todos los casos la “textura – generalización FAO” presenta una composición similar, pero marcadamente más fina que su par, tal cual había sido previsto, dado que esta describe la capa más superficial (la “textura – calicatas” es del estrato inorgánico).

Textura USDA		
#	Calicatas	Generalización FAO
1	Franco limosa	Franco
3	Franco	Franco arcillosa
4	Franco arenosa	Franco arcillosa
5	Areno franca	Franco arcillo - arenosa

**Tabla 3.2-3** Clases texturales por zona principal desde las calicatas y tabla FAO (elab. propia)

Finalmente, habiendo validado los datos extraídos desde la tabla FAO, se presentan las características finales por capa principal (tabla 3.2-4).

#	% Ar	Geología		Suelo Superficial					
		Form. Geo	Descrip.	Edaf. FAO	Textura USDA	%Arc.	%Limo	%Arenas	%MO
1	11.25	Dep. Aluviales Recientes	Material aluvial	Fluvisols	Franco	24.8	39.4	35.8	2.16
2	8.78	Portuguesa	Riodacita fracturada	Andosols	Franco arenosa	9.3	26.2	64.5	1.40
3	59.02	Caudalosa Mbo. Med.	Andesita fracturada	Andosols	Franco arcillosa	29.2	39.6	31.2	3.95
4	12.86	Caudalosa Mbo. Inf.	Andesita muy fracturada	Andosols	Franco arcillosa	29.2	39.6	31.2	3.95
5	8.09	Labra	Arenisca cuarzosa	Leptosols	Franco arcillo - arenosa	24.9	16.2	58.9	0.97

%Ar = Área relativa en porcentaje

%MO = Porcentaje de Materia Orgánica en el suelo (Arcilla + Limo + Arena)

**Tabla 3.2-4** Resumen de propiedades y descripciones de la estratigrafía (elab. propia)

### 3.3 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

#### 3.3.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Para la inspección y elección de las estaciones meteorológicas pertinentes al estudio, se recurre al visor web de la red nacional de estaciones hidrológicas y meteorológicas del SENAMHI (<http://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>), desde el cual se descarga la información disponible de las estaciones que se estiman útiles con fines de diseño (cuadro 3.3-1), debido a su cercanía geográfica (fig. 3.3-1) y/o similar elevación con la cuenca de estudio, la extensión de su período con datos, entre otros factores relevantes.

ESTACIÓN	PARÁMETROS				COORDENADAS					
	PRECIPIT. MEDIA	TEMPERAT. MÁX	TEMPERAT. MIN	TEMPERAT. MED	DEPARTAM.	PROV.	DISTRITO	LONG.	LAT.	ELEV. (msnm)
Paras (156203)	1965 - 1973 1975 - 1981	NA	NA	NA	AYACUCHO	CANGALLO	PARAS	74° 38'1"	13° 33'1"	3,330
Huancapi (000665)	1965 - 1982 1994 - 2014	1994 - 1999 2002 - 2014	1994 - 2014	1994 - 2014	AYACUCHO	VICTOR FAJARDO	HUANCAPÍ	74° 04'14"	13° 45'1"	3,120
La Quínuá (000663)	1965 - 1979 1988 - 2014	1965 - 1974 1977 - 1979 1988 - 2014	1970 - 1976 2011 - 2014	1966 - 1979 1998 - 2005 1988 - 2014	AYACUCHO	HUAMANGA	QUÍNUA	74° 08'7"	13° 02'2"	3,316
Los Libertadores (000706)	1983 - 1991	1983 - 1991	1983 - 1991	1983 - 1991	HUANCAVELICA	HUAYTARA	PILPICHACA	74° 55'1"	13° 24'1"	4,200
Túnel Cero (000647)	1967 - 1982 1984 - 1990 1993 - 2015	NA	NA	NA	HUANCAVELICA	HUAYTARA	PILPICHACA	75° 5'10"	13° 15'34"	4,512

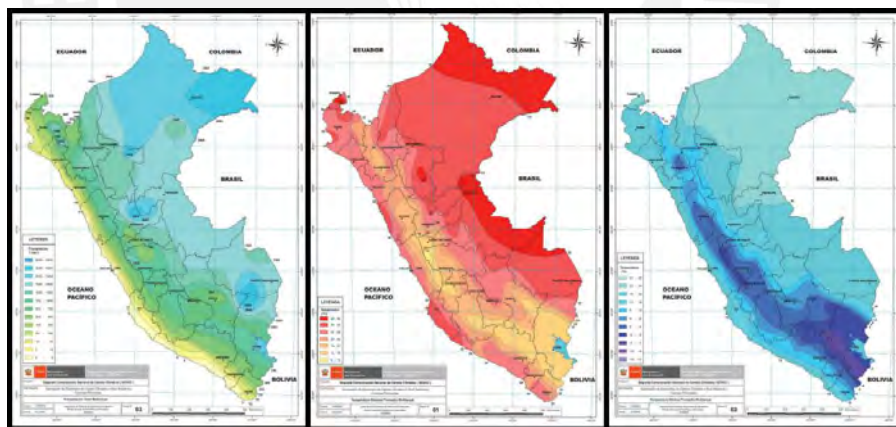
ELEVACIÓN PROYECTO: 4532 MSNM

**Cuadro 3.3-1** Resumen de información meteorológica histórica (elab. propia)



**Figura 3.3-1** Ubicación geográfica de las 5 estaciones y la cuenca Champacocha (elab. propia)

Para un mejor análisis de la climatología regional se hace uso de los mapas nacionales<sup>13</sup> de variación espacial de *Precipitación Promedio Anual -P<sub>p</sub>-*, y de *Temperatura Promedio Máxima -T<sub>máx</sub>-* y *Mínima -T<sub>min</sub>-* (SENAMHI, 2010). Los valores absolutos de estos mapas (fig. 3.3-2) no son muy precisos, sin embargo, marcan tendencias de rangos regionales.



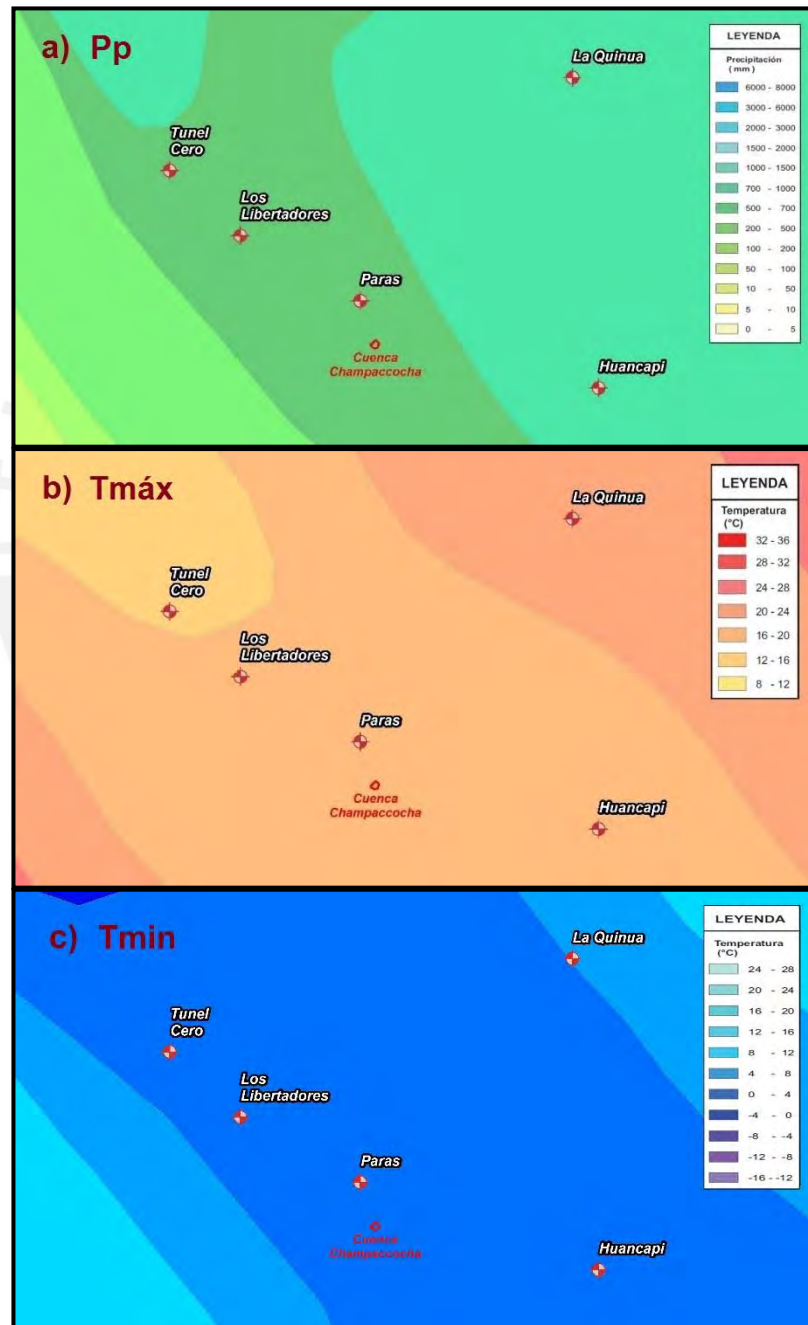
**Figura 3.3-2** Mapas de variación espacial de P<sub>p</sub>, T<sub>máx</sub> y T<sub>min</sub> en el período 1965 - 2006 (SENAMHI, 2010)

Es complejo el análisis para la elección de las estaciones a utilizar para representar el clima de la zona de estudio. Usualmente, los patrones de temperatura se mantienen en grandes extensiones, por lo que se usan las tres estaciones disponibles para extrapolar la información. Al contrario, los patrones de precipitación pueden variar considerablemente entre lugares relativamente poco distantes, por lo que solo se usan las estaciones que coinciden con la cuenca de estudio en los mismos rangos de P<sub>p</sub>, T<sub>máx</sub> y T<sub>min</sub> (fig. 3.3-3).

<sup>13</sup> Mapas a escala ampliada en anexo III

Naturalmente, este análisis a priori debe ser verificado luego con coeficientes de correlación representativos (mayores a 0.80) en gráficas de la variable analizada vs altitud.

Debido a este análisis, aunque la estación *Túnel Cero* tiene la elevación más parecida, además del período de datos más extenso, esta no puede representar directamente la climatología del proyecto, ya que si bien cae dentro del mismo rango de  $T_{\min}$  y  $P_p$ , no coincide en  $T_{\max}$ . Por lo tanto, se escogen las estaciones *Los Libertadores* y *Paras* para caracterizar la precipitación de la zona de estudio, las cuales sí convergen dentro de los tres rangos visualizados.



**Figura 3.3-3** Discretización regional en el área de actuación de las estaciones seleccionadas de la variación espacial de a) Pp, b) Tmáx, y c) Tmin (elab. propia)

### 3.3.2 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)

El AED consiste en el análisis de los datos empleando una variedad de técnicas para lograr un mayor entendimiento sobre ellos y las relaciones existentes entre las variables analizadas (CAZALAC, 2015). Para el procesamiento de los datos en esta sección se usan principalmente los softwares *Hydrognomon* y *CHAC*.

El primero, Hydrognomon, desarrollado por el grupo ITIA de la *Universidad Técnica Nacional de Atenas*, ostenta un alto performance en el procesamiento estadístico, con múltiples análisis para su aplicación en la ingeniería hidrológica. Usado -entre otros- para el estudio de la "Modernización de la gestión y supervisión del sistema de recursos hídricos de Atenas".

Por otro lado, CHAC (*Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas*), desarrollado por el *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)* de España, aplica los modelos matemáticos de Témex, para lo cual ofrece un conjunto de herramientas interesantes, entre las cuales la más potente probablemente sea su módulo de completación de datos. CHAC ha sido utilizado para elaborar el *Plan Nacional de Aguas de Portugal* y, en su versión distribuida (SIMPA), en el *Plan Hidrológico de España (Libro Blanco)*.

#### Evaluación preliminar

Un ciclo completo de fluctuaciones hidrológicas dura un período de tiempo que se denomina año hidrológico, y su aplicación es fundamental para lograr la mejor independencia estadística entre los valores anuales, por lo que se usa como estándar al momento de procesar las series de tiempo. En Perú, comienza el 1 de Septiembre y termina el 31 de Agosto del año siguiente.

En primer lugar, los datos meteorológicos se introducen en CHAC para su visualización general. El programa proporciona una presentación muy útil de las series de tiempo disponibles en paralelo (fig. 3.3-4), en la cual se aprecian visualmente las *lagunas* a rellenar.

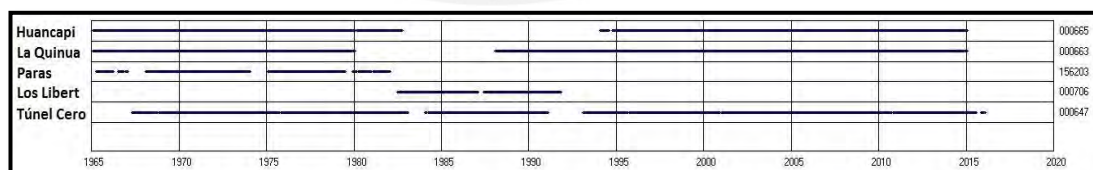


Figura 3.3-4 Cronograma inicial de Pp de las cinco estaciones analizadas (elab. propia)

Por un lado, es útil analizar los histogramas superpuestos de todas las estaciones (fig. 3.3-5) para obtener una idea general de la distribución mensual de todas las variables involucradas. Asimismo, la dispersión de los datos se estudia mediante su representación en *gráficos de caja -Box Plots-* (realizados en el software estadístico SPSS), en los cuales se visualiza de forma preliminar algunos *outliers* (datos fuera de rango) que pueden significar errores de medición en la muestra (fig. 3.3-6).

Como se observa en ambas técnicas gráficas<sup>14</sup>, los valores de temperatura se mantienen con una variabilidad mínima, al contrario de la precipitación, que presenta diferencias importantes. En consecuencia, en adelante solo se comprueba la validez de los datos de precipitación.

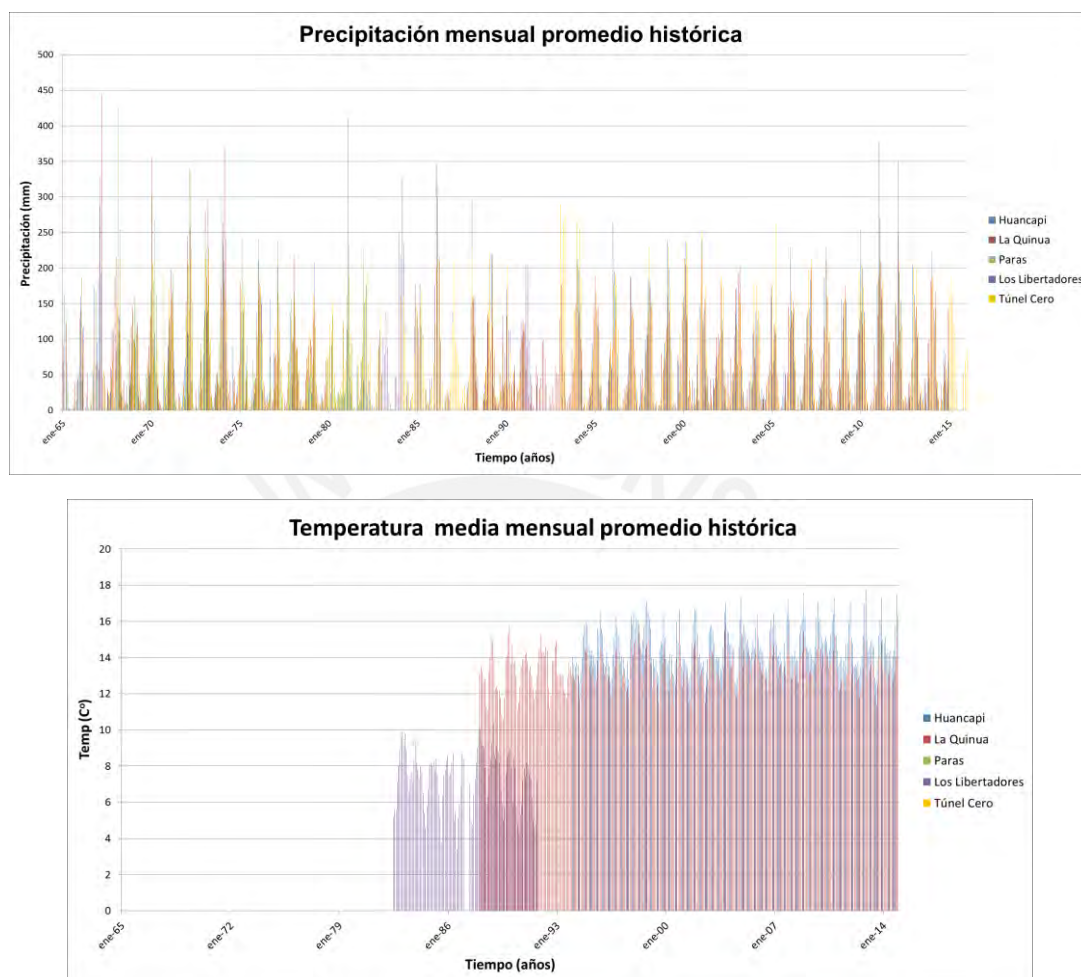


Figura 3.3-5 Histogramas de a) Pp y b) Tmed (elab. propia)

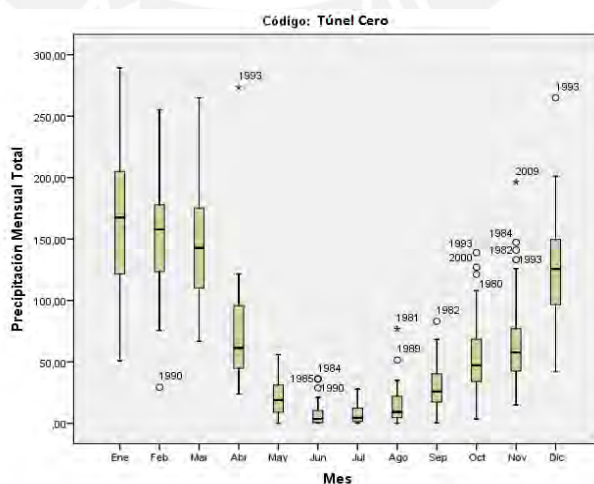


Figura 3.3-6 Box Plot de la precipitación mensual promedio, Pp (elab. propia)

<sup>14</sup> Para revisar los registros completos de cronogramas, histogramas y box plots, ver anexo II.

Las siguientes etapas se realizan con Hydrognomon, el cual ofrece para la presentación de series de tiempo un muy útil conmutador de vista lista/calendario. Introducidos los datos en la vista calendario (fig. 3.3-7) son ordenados por año gregoriano o hidrológico, y además se muestran directamente los descriptores estadísticos (media, la desviación estándar, etc.).

	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	Sum	Mean	Stdev	Var coef	N	Miss	Max	Min
1992-93					289.30	179.80	264.90	273.50	7.50	1.60	7.80	4.60	1029.00	128.62	135.64	1.05	8	4	289.30	1.60
1993-94	35.50	139.00	141.00	265.00	202.50	255.30	186.40		32.20	0.00	16.70	0.00	1273.60	115.78	102.70	0.89	11	1	265.00	0.00
1994-95	45.20	67.80	85.90	127.70	165.20	118.70	112.00	64.40	9.60	0.00	0.00		796.50	72.41	55.51	0.77	11	1	165.20	0.00
1995-96	16.80	68.60	95.10	85.10	177.00	190.60	176.10	113.20	34.80	0.00	6.10	12.70	976.10	81.34	70.56	0.87	12	0	190.60	0.00
1996-97	25.40	33.60	38.00	119.50	133.10	136.20	85.00	50.40	25.80	0.00	0.30	25.50	672.80	56.07	49.66	0.89	12	0	136.20	0.00
1997-98	32.00	45.20	81.60	138.70	230.20	146.90	147.00	49.10	0.00	12.90	0.00	7.10	890.70	74.22	74.87	1.01	12	0	230.20	0.00
1998-99	17.50	46.00	76.90	97.20	114.70	229.90	170.70	84.20	54.30	0.50	2.20	1.70	895.80	74.65	71.42	0.96	12	0	229.90	0.50
1999-00	24.00	108.00	35.60	152.70	214.30	236.60	202.50	60.00	33.30	0.10	9.60	7.10	1083.80	90.32	88.78	0.98	12	0	236.60	0.10
2000-01	31.90	127.00		171.30	254.20	135.10	175.40	82.70	13.20	8.20	12.90	5.10	1017.00	92.45	85.66	0.93	11	1	254.20	5.10
2001-02	31.60	45.60	74.90	76.30	101.00	188.50	171.90	57.00	33.30	9.10	23.80	5.60	818.60	68.22	59.54	0.87	12	0	188.50	5.60
2002-03	41.00	43.20	74.90	120.20	113.30	165.70	148.80	56.50	10.10	0.60	1.30	4.90	780.50	65.04	59.23	0.91	12	0	165.70	0.60
2003-04	2.30	63.10	40.80	178.20	50.80	175.70	140.40	121.60	6.30	10.00	3.60	7.00	799.80	66.65	68.92	1.03	12	0	178.20	2.30
2004-05	43.10	25.80	57.70	175.70	100.60	122.80	261.90	42.90	9.00	0.00	0.00	2.20	841.70	70.14	81.69	1.16	12	0	261.90	0.00
2005-06	13.80	14.00	48.00	133.30	167.40	136.50	142.80	76.90	0.70	17.00	0.00	11.70	762.10	63.51	64.28	1.01	12	0	167.40	0.00
2006-07	24.70	56.30	80.40	132.00	197.70	119.20	216.70	78.60	22.40	9.30	3.20	6.70	947.20	78.93	73.84	0.94	12	0	216.70	3.20
2007-08	26.40	41.90	52.20	115.50	211.20	160.10	110.20	31.60	5.00	0.00	0.10	13.40	767.60	63.97	69.41	1.09	12	0	211.20	0.00
2008-09	10.70	54.90	42.50	113.40	154.40	157.60	103.60	76.80	31.10	0.10	6.70	4.30	756.10	63.01	57.60	0.91	12	0	157.60	0.10
2009-10	16.50	56.60	196.30	167.10	203.00	172.80	130.30	28.70	12.40	0.00	0.00	1.90	985.60	82.13	84.21	1.03	12	0	203.00	0.00
2010-11		39.80	39.80	182.40	214.90	158.90	181.90	116.80	16.30	0.70	0.10	4.40	956.00	86.91	84.73	0.97	11	1	214.90	0.10
2011-12	13.90	20.80	49.40	149.60	91.40	209.10	148.90	119.50	14.40	21.10	3.00	3.10	844.20	70.35	70.88	1.01	12	0	209.10	3.00
2012-13	17.10	34.00	73.90	201.20	123.00	200.20	109.20	37.30	29.60	11.70	5.00	16.20	858.40	71.53	71.23	1.00	12	0	201.20	5.00
2013-14	0.30	68.40	46.90	171.60	188.20	103.50	142.80	40.40	18.50	3.80	15.30	33.40	833.10	69.43	66.30	0.95	12	0	188.20	0.30
Mean	28.99	55.22	68.39	124.90	163.75	154.14	146.96	72.20	20.98	7.29	7.37	14.44	770.82							
Standard deviation	17.64	29.97	36.79	43.76	54.83	45.86	49.62	41.62	15.29	9.21	7.81	14.95								
Variance coefficient	0.61	0.54	0.54	0.35	0.33	0.30	0.34	0.58	0.73	1.26	1.06	1.04								
Number of values	41	44	43	44	44	43	44	44	45	45	45	44								
Missing values	8	5	6	5	5	6	5	5	4	4	4	5								
Maximum value	83.00	139.00	196.30	265.00	289.30	255.30	264.90	273.50	55.90	36.20	27.90	76.70								
Minimum value	0.30	3.40	15.00	42.00	50.80	29.30	66.80	23.70	0.00	0.00	0.00	0.00								

Figura 3.3-7 Vista de calendario por año hidrológico con descriptores estadísticos (elab. propia)

## Análisis de consistencia

La metodología de la *Curva de Doble Masa (CDM)* es una prueba de "consistencia regional" entre mediciones de precipitación de estaciones vecinas. Esta prueba tiene la intención de detectar y, si es el caso, corregir cambios artificiales en las condiciones que afectan las mediciones, restaurando la homogeneidad de la muestra.

En primera instancia, se condiciona un mínimo de 20 puntos (años hidrológicos completos) en común entre las estaciones analizadas para que la metodología sea válida. Esta medida filtra su aplicación solo para las estaciones de *La Quinua*, *Huancapi* y *Túnel Cero*. Por otro lado, la *CDM* necesita siempre de una estación patrón, la cual es utilizada como referencia regional, y cuyos datos se consideran confiables a toda escala. En consecuencia, se analiza la fiabilidad de la información, para lo cual, tomando como base las condiciones de campo observadas en *Google Earth*, se realiza una valoración de la vulnerabilidad del control que puede existir en las estaciones debido a su accesibilidad o condiciones agrestes (tabla 3.3-1), por las cuales puedan presentar distorsiones en sus mediciones, especialmente en períodos antiguos, donde el control estricto no estaba totalmente garantizado.

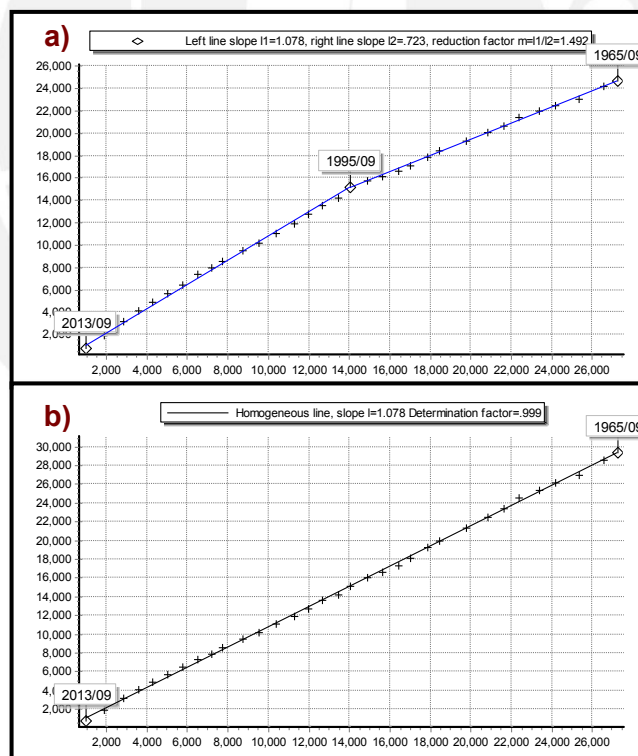
Por lo tanto, en base a estas valoraciones, se elige a **La Quinua como estación patrón**.

ESTACIÓN	CONDICIONES EN CAMPO	VALORACIÓN
Huancapi	Estación ubicada en mitad de valle en zona interior alejada de poblados importantes.	Probabilidad aceptable de buen control
La Quinoa	Estación a media ladera ubicada en la periferia de la ciudad de Huamanga.	Mayor Probabilidad de buen control
Túnel Cero	Estación ubicada en zona alta con condiciones agresivas (heladas).	Control especialmente difícil

**Tabla 3.3-1** Valoración de la fiabilidad de la medición de las estaciones (elab. propia)

Posteriormente, se crean directamente las *CDM* en Hydrognomon (previa agregación anual de volúmenes mensuales), acumulando las cantidades desde los registros más recientes.

En el caso de la *CDM* de *La Quinoa* vs *Huancapi* (gráfico 3.3-1a), se aprecian tendencias muy marcadas entre las estaciones, lo cual confirma que existe una alta correlación entre los datos, sin embargo, también se observa una división muy notoria de la tendencia en dos períodos cronológicos. Este par de valores en donde sucede el cambio de pendiente es denominado *punto de quiebre*, y es determinado por Hydrognomon, mediante su algoritmo de detección automática, en el año hidrológico 1995/96.



**Gráfico 3.3-1** CDM de La Quinoa vs Huancapi a) original y b) homogeneizada (elab. propia)

Sin embargo, para que la muestra sea homogénea, la *CDM* debe presentar una sola pendiente, por lo que se debe elegir una de las dos partes para que quede intacta y sirva como referencia para corregir el período contiguo. Debido a que los períodos más antiguos tienen mayor probabilidad de estar influenciados por malas condiciones de medición, ante una

diferenciación evidente de períodos, y ante la falta de información histórica de las condiciones de mantenimiento y control de la estación, solo queda asumir para restaurar la homogeneidad que la información más reciente es la más confiable.

En el ajuste gráfico realizado se aprecia la corrección de pendiente con un factor igual a 1.492 (1.078/0.723, por las pendientes de las rectas ajustadas del período más reciente y más antiguo, respectivamente). Finalmente, Hydrognomon automáticamente extiende la corrección para los registros a escala mensual y presenta la *CDM* homogeneizada (gráfico 3.3-1b).

La *CDM* de *La Quinua vs Túnel Cero* presenta similares condiciones y se puede revisar, junto a otra información relevante de este apartado, en el anexo II.

Asimismo, el módulo también detecta automáticamente *outliers*, pero en ninguno de los casos se mostraron notificaciones al respecto. Por esta razón, y ya que se ha comprobado la consistencia regional de las series, ya no es necesario ejecutar una prueba de datos extremos<sup>15</sup>.

### **3.3.3 EXTENSIÓN DE SERIES HIDROLÓGICAS**

Este acápite se realiza para todas las variables, y se desarrolla en dos etapas: correlación para el rellenado de datos faltantes (*lagunas*), y extensión de data temporal sin regresión.

#### **Correlación para rellenado de *lagunas* de datos**

Esta completación se realiza mediante el algoritmo CORMUL, subrutina del programa CHAC, un modelo de regresión bivariado con estacionarización previa mensual de las series de datos (Álvarez, 2013). Esto último significa que antes de realizar las correlaciones múltiples entre estaciones, el programa separa las series temporales en sus tres componentes: tendencia, factor cíclico estacional y residuo; para luego de su proceso de ajuste y predicción normalizada, las devuelva a su estado general, terminando el proceso de rellenado.

CORMUL crea una ecuación de regresión para cada par de estaciones correlacionadas con la estación a completar. Para elegir la ecuación que otorga el dato con mejor performance, se genera una matriz de priorización, la cual es función de los coeficientes de correlación múltiple y del número de datos comunes entre las estaciones. La influencia de este último se ajusta e incrementa de forma proporcional con el exponente de priorización.

Por consiguiente, se elige el par de estaciones con el coeficiente de priorización más alto, y este va decreciendo de forma gradual hasta llegar al par de estaciones que contengan el mes que se quiere completar. Este descenso es controlable a través del umbral de priorización, el cual establece un límite inferior, lo cual permite controlar la acumulación de errores, ya que

---

<sup>15</sup> El análisis de datos atípicos mediante el módulo *Range Check*, se puede revisar en el anexo I

un mayor umbral de coeficiente de priorización implica una mejor calidad de datos predichos, sin embargo, en contraparte, restringe la cantidad de datos completados (Álvarez, 2011).

Valores usuales en la bibliografía fijan al primero en 0.10, y admiten un umbral hasta de 0.70 (Álvarez, 2011), por lo que se usan estos valores para ejecutar la simulación.

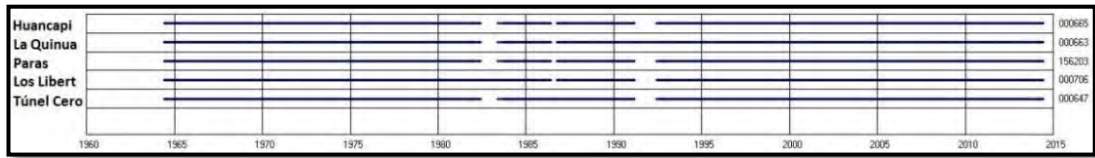


Figura 3.3-8 Series de tiempo de Pp luego del completado por curva de doble masa (elab. propia)

En el caso de las series de precipitación promedio mensual, se llega a un nivel de completación del 88% de los datos faltantes, lo cual demuestra la alta efectividad del procedimiento (fig. 3.3-8). El resto de lapsos de tiempo no fue rellenado ya que CORMUL completa por regresión lineal múltiple (mínimo dos estaciones de referencia). Debido a esta situación, es conveniente utilizar el módulo de *Regresión y Rellenado* de Hydrognomon y, mediante una regresión lineal simple, completar cualquiera de las estaciones que no aportan datos de referencia a las lagunas remanentes (puede ser *Huancapi* o *Paras*), y así cumplir el requisito de las dos estaciones.

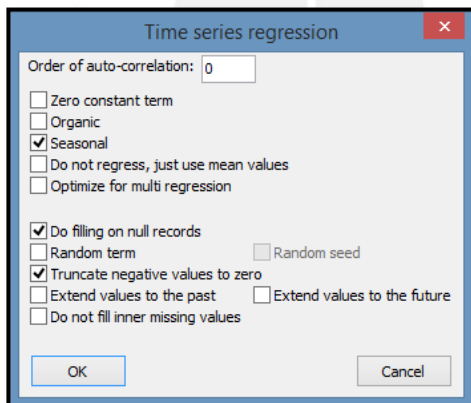


Figura 3.3-9 Configuración de la regresión en Hydrognomon para Pp (elab. propia)

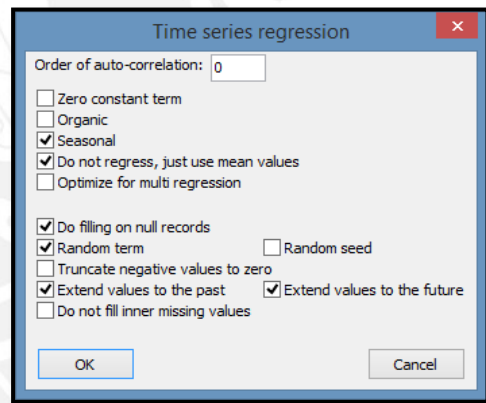


Figura 3.3-10 Configuración de la regresión en Hydrognomon para Tmin (elab. propia)

Por consiguiente, la regresión se ejecuta (fig. 3.3-9) bajo el criterio de estacionalidad (la muestra se subdivide en 12 series, por cada mes), y se rellenan los pocos meses faltantes de la estación *Huancapi*. Luego, en CHAC se termina la completación total de las series de tiempo.

Por otro lado, en el caso de las temperaturas, no es posible en este momento aplicar el algoritmo CORMUL, dado que en ningún período se cuenta con dos estaciones de referencia.



Figura 3.3-11 Cronograma inicial de Tmin en CHAC (elab. propia)

Dada la naturaleza de esta variable, es aceptable rellenar series de datos mediante regresión lineal simple, sin embargo, existen casos en que se detectan lapsos de tiempo sin datos en todas las estaciones, especialmente en la variable de  $T_{\min}$  (fig. 3.3-11).

### Extensión de series de tiempo sin regresión

Debido a la situación anteriormente comentada, solo queda recurrir a una técnica de rellenado que no requiera estaciones de referencia, lo cual restringe bastante su alcance.

En el caso de la temperatura, debido a que es una variable relativamente constante con variaciones mínimas en su comportamiento estacional, se considera suficientemente aproximado el uso de valores promedio mensuales de los registros para extender sus datos más allá de sus límites, y así luego poder correlacionarlos con la data de las demás estaciones en un mismo período de tiempo, volviendo finalmente a CHAC para completar los registros.

Por lo tanto, se ejecuta la predicción con las opciones anteriores, pero sin restringir el uso de valores negativos dado que es temperatura, e incluyendo además un término aleatorio como recurso para contrarrestar la implícita subestimación de la desviación estándar (fig. 3.3-10).

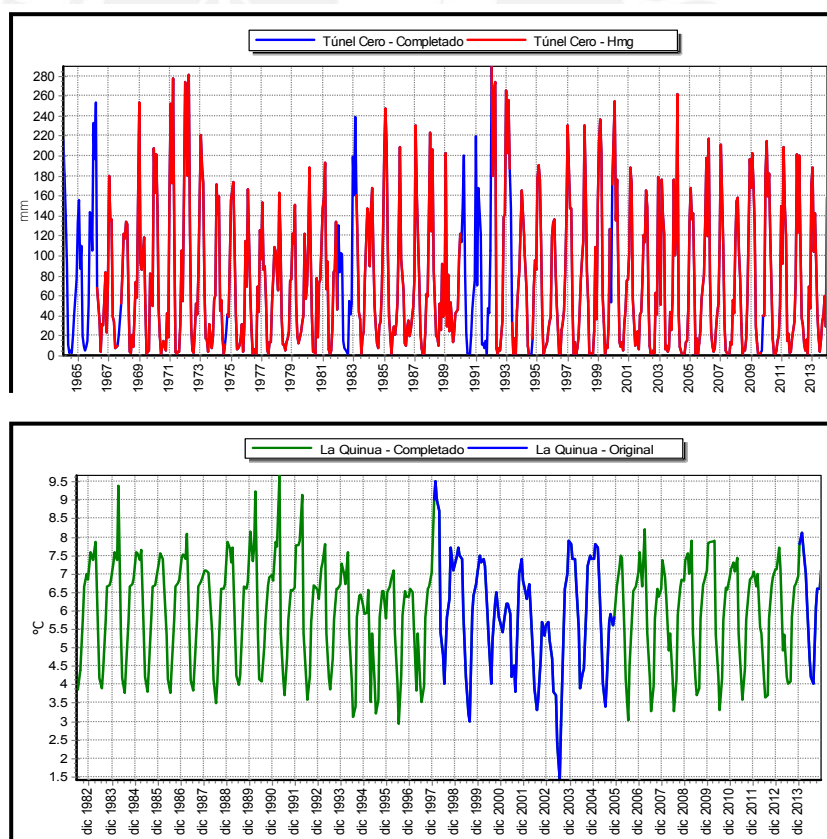


Gráfico 3.3-2 Histogramas completados de la estación Túnel Cero de a) Pp y b) Tmin (elab. propia)

Como se observa, los datos completados siguen una tendencia lógica respecto a la serie base, tanto en los histogramas de precipitación como de temperatura (gráfico 3.3-2).

Por último, para una mejor representatividad de la muestra, debido a la mayor confiabilidad de las series de tiempo más recientes, solo se toman los últimos 30 años, más un año previo a esta serie (el primer año tiene una utilidad especial en el cap. 3.4.3), por lo que, finalmente, los 31 años transcurrirán desde el año hidrológico 1982/83 hasta el 2013/14.

### 3.3.4 INTEGRACIÓN ESPACIAL DE VARIABLES

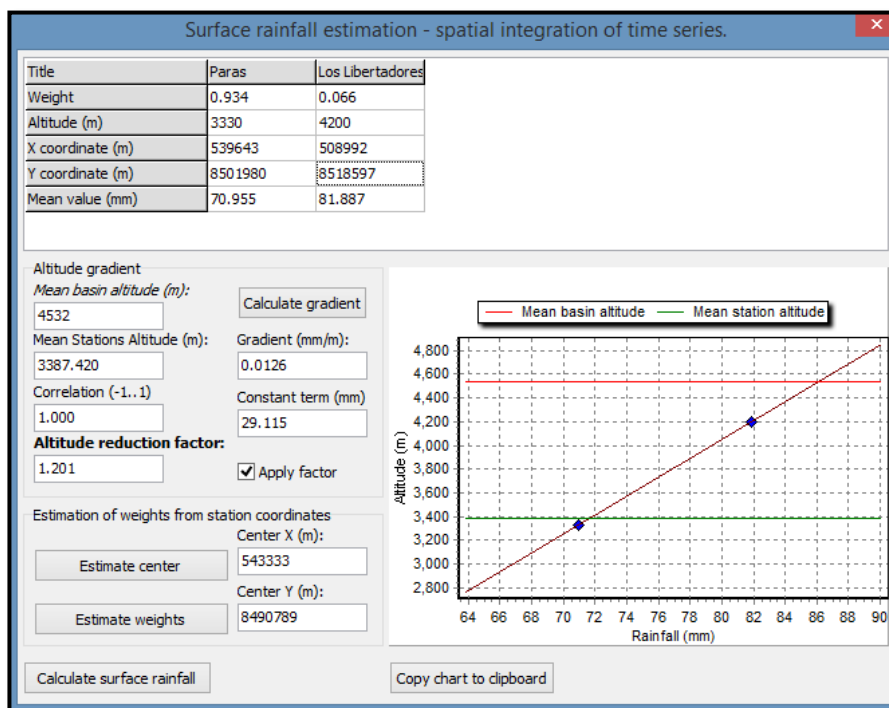


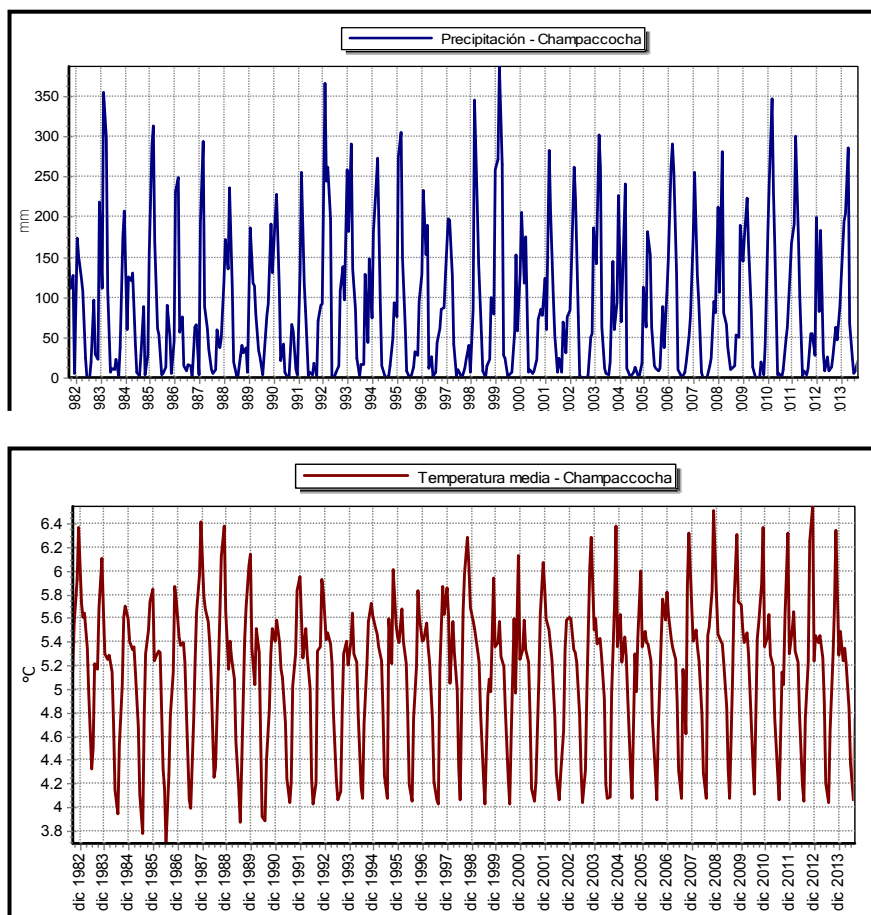
Figura 3.3-12 Cuadro de integración espacial de la precipitación superficial (elab. propia)

La ponderación areal de las variables para finalmente caracterizar la climatología de la cuenca Champacocha se realiza con el módulo de *Integración Espacial* de Hydrognomon, en el cual se introducen los datos geográficos de las estaciones y la cuenca de estudio (fig. 3.3-12). El peso que cada estación otorga a la combinación se determina por el método de la distancia inversa, que el programa calcula automáticamente pulsando el botón *Estimar Pesos*.

Con todos los datos rellenos, Hydrognomon calcula directamente el valor mensual promedio histórico de cada estación, y luego realiza una regresión lineal para estimar el cambio con la altitud de la variable analizada. Como resultado se presenta un gráfico de precipitación vs altitud en donde se muestran la altitud media de la cuenca, la altitud ponderada de las estaciones, y la recta de regresión, junto a sus estadísticos descriptores, con los cuales se calcula el factor de corrección por altitud. Finalmente, se calcula la lluvia areal, creando la nueva serie ponderada de la cuenca de estudio.

Tal como explicó previamente, para el caso de la precipitación se usan solo las estaciones *Paras* y *Los Libertadores*, mientras que para las temperaturas se usan todas las estaciones disponibles, es decir, *Los Libertadores*, *La Quinua* y *Huancapi*.

En el caso de las precipitaciones (fig. 3.3-12), los resultados son influenciados casi de forma absoluta por la estación Paras, dada su mayor cercanía a la cuenca de estudio (cálculo de pesos por distancia inversa), determinando un factor de corrección por altitud de 1.2. Finalmente, se obtiene la nueva serie de precipitación mensual de la cuenca Champacocha (gráfico 3.3-3a).



**Gráfico 3.3-3** Histograma de la cuenca Champacocha de a) Pmed y b) Tmed (elab. propia)

Del mismo modo, se procesan las series de temperaturas (ver anexo II), hallando coeficientes de correlación altos ( $|r| > 0.93$ ) en todos los escenarios. Lógicamente, al contrario de la precipitación, los factores de corrección son menores que la unidad dado que la relación de la altitud con la temperatura es inversamente proporcional (coeficientes  $r$  negativos).

En el caso específico de la  $T_{\min}$ , se ejecuta la integración espacial en grados Kelvin ya que la extrapolación en grados Celsius sobrepasa la escala positiva, dado que la estación *Los Libertadores* posee la mayoría de sus valores bajo cero. Luego de ejecutado el aplicativo, se devuelve la serie a escala Celsius.

Una vez creadas todas las series temporales de la cuenca Champacocha, se determina que la precipitación media anual es 1033.01 mm y que la temperatura media anual es 5.15 C°, valores que encajan perfectamente en los rangos de  $P_{\text{med}}$  (1,088.5 - 513.4 mm) y  $T_{\text{med}}$  (6.9 - 4.6 C°) de la zona de vida “Páramo muy húmedo Subalpino Subtropical” (estimado en cap. 3.2).

Asimismo, es conveniente contrastar los valores promedio de las series obtenidas con estudios zonales que los validen. En el caso de las precipitaciones, dado que presentan variaciones espaciales importantes, no es adecuada una comparación con valores generalizados regionales, sin embargo, en el caso de las temperaturas, sí puede ser un indicador útil.

Al respecto, en 2010 la ANA estimó valores promedio mensuales de las variables meteorológicas de las siete grandes subcuencas del río Pampas, entre las cuales se encuentra el Alto Pampas (a la cual pertenece la cuenca de estudio), por lo que se comparan sus valores de temperatura con los resultados obtenidos (tabla 3.3-2). Esta validación debe realizarse en una escala absoluta, por lo que se calcula el porcentaje de variación desde la escala Kelvin. Esta medida es más relevante en el caso de la temperatura mínima, dado que sus valores son negativos y relativamente cercanos a los cero grados Celsius.

Como se aprecia, las diferencias son despreciables, comprobando la validez del cálculo.

**Subcuenca regional Alto Pampas**

Tmed (C°)	ENE.	FEB	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ANA	6.00	6.30	6.30	6.00	5.30	4.30	3.80	4.30	4.80	5.30	5.80	6.30	5.38
Calculado	5.48	5.42	5.38	5.23	4.80	4.23	4.04	4.73	5.19	5.66	5.97	5.63	5.15
%Var. (K°)	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.0%	-0.1%	-0.2%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.2%	0.1%

Tmáx (C°)	ENE.	FEB	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ANA	11.30	11.30	12.30	12.80	13.00	13.00	12.30	12.50	12.30	12.30	12.80	12.80	12.39
Calculado	14.17	13.68	13.72	13.93	14.20	13.80	13.89	14.40	14.92	15.57	15.87	15.09	14.44
%Var. (K°)	-1.0%	-0.8%	-0.5%	-0.4%	-0.4%	-0.3%	-0.5%	-0.7%	-0.9%	-1.1%	-1.1%	-0.8%	-0.7%

Tmin (C°)	ENE.	FEB	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ANA	-0.30	0.00	-0.30	-1.00	-2.80	-4.80	-5.00	-4.30	-2.50	-1.80	-1.30	-0.80	-2.07
Calculado	-3.51	-3.44	-3.42	-4.08	-5.89	-7.08	-7.57	-6.80	-5.33	-4.48	-4.28	-3.89	-4.98
%Var. (K°)	1.2%	1.2%	1.1%	1.1%	1.1%	0.8%	0.9%	0.9%	1.0%	1.0%	1.1%	1.1%	1.1%

**Tabla 3.3-2** Comparación de resultados de temperatura con valores regionales (elab. propia)

## 3.4 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO

### 3.4.1 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

#### Determinación del coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>)

Tomando como base las descripciones precisadas por la FAO<sup>16</sup>, se infiere que el cultivo definido previamente como césped de puna se adapta mejor a la definición de *Heno -Rye Grass-*, y las lagunas al tipo *Agua libre somera en climas sub-húmedos o trópicos*, detallados en el cuadro 2.1-1, desde el cual son tomados los valores de K<sub>c</sub>. Ya que este tipo de pasto presenta valores muy cercanos durante su ciclo de vida, se usa el valor promedio de K<sub>c</sub> = 1. Este coeficiente resulta consistente con la realidad, ya que sus características y altura (0.11 m) son prácticamente las mismas que las del cultivo de referencia.

<sup>16</sup> Ver Ref. [25]

En el caso de los cuerpos de agua, aparte de la laguna Champacocha, existe una adicional en el perímetro de la cuenca (fig. 3.4-1). Estas lagunas solo liberan agua mediante evaporación, y dado que son poco profundas su  $K_c$  es 1.05. Sin embargo, no representan ni el 1% de la superficie total, por lo que dadas estas condiciones se fija un único  $K_c = 1$  para toda la cuenca.

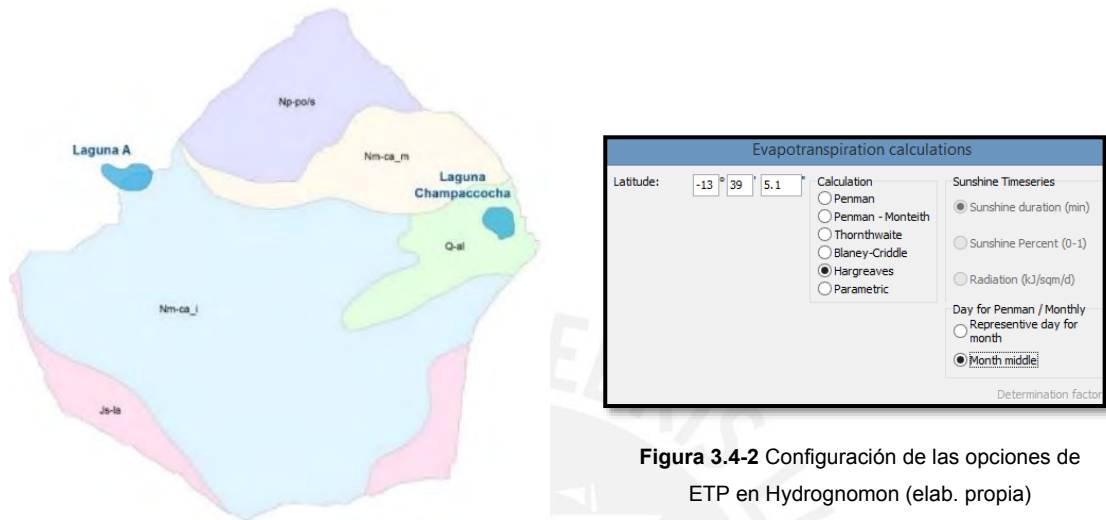


Figura 3.4-1 Ubicación de lagunas actuales dentro de la cuenca (elab. propia)

Figura 3.4-2 Configuración de las opciones de ETP en Hydrognomon (elab. propia)

## Estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

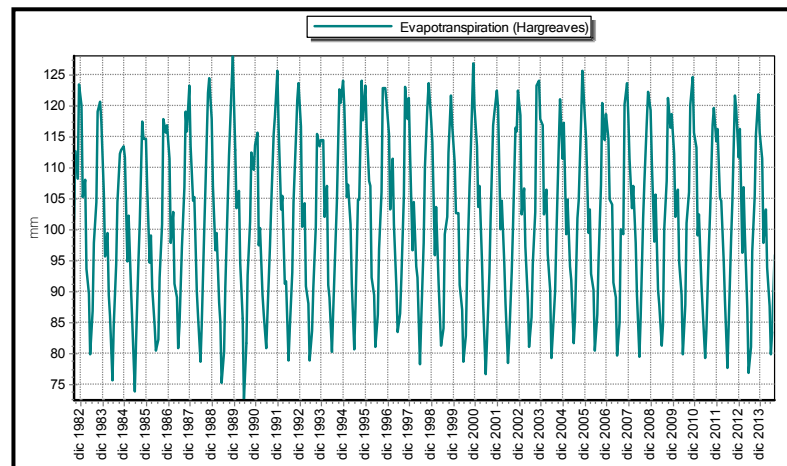


Gráfico 3.4-1 Histograma de Evapotranspiración Potencial en Hydrognomon (elab. propia)

Ya que esta sección se desarrolla con la fórmula de Hargreaves (cap. 2.1), se utilizan las series temporales de  $T_{med}$ ,  $T_{máx}$  y  $T_{mín}$ , calculadas en el capítulo anterior. Esta operación se ejecuta mediante el módulo de *Evapotranspiración* de Hydrognomon (fig. 3.4-2), en el cual, una vez incorporadas las series mencionadas, se introduce la latitud del centroide de la cuenca de estudio y se indica que para los cálculos de determinación de la radiación solar extraterrestre el día representativo se fije a mitad del mes.

Finalmente, se obtiene la serie temporal de  $ET_o$  (gráfico 3.4-1), que es igual a la ETP (ya que  $K_c$  es 1), desde la cual se calcula un valor promedio anual de 1207.29 mm.

Tal como se realizó con las temperaturas, se comparan los resultados con los valores de la cuenca del *Alto Pampas* (ANA, 2010). Si bien la evapotranspiración potencial es una variable más compleja y no es tan constante a escala regional como la temperatura, la variación a escala anual entre ambos registros no debería ser tan significativa. Como se aprecia en la tabla 3.4-1, la variación anual calculada respecto del promedio regional es aceptable (menos del 10%), por lo que se confirma la validez de los cálculos.

ETP (mm)	ENE.	FEB	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
ANA	99.10	95.10	92.90	89.10	82.70	79.70	85.20	85.20	91.00	105.50	105.90	106.40	1117.8
Calculado	113.93	100.56	104.57	93.16	88.20	78.95	84.27	96.21	103.98	117.74	119.18	118.66	1219.4
%Var. ( $K^o$ )	-15.0%	-5.7%	-12.6%	-4.6%	-6.7%	0.9%	1.1%	-12.9%	-14.3%	-11.6%	-12.5%	-11.5%	-9.1%

Tabla 3.4-1 Comparación de resultados de ETP con valores regionales (elab. propia)

### 3.4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO DE TÉMEZ

#### a) Capacidad máxima de retención de agua en el suelo -no saturado-, $H_{m\acute{a}x}$ (mm)

Debido al criterio fijado en el cap. 2.2.2, la cuenca se clasifica en tres grupos:

- Cuerpos de agua superficial: las lagunas son medidas en base a la imagen satelital, y caen dentro de capas aluviales y volcánicas (fig. 3.4-1).
- Espacios con poca vegetación: debido a lo observado en las fotografías de campo e imágenes satelitales, es evidente que la zona de la Fm. Portuguesa presenta cobertura vegetal escasa debido a su rango superior de elevación, dejando notar la coloración oscura de su capa formadora.
- Praderas y pastizales naturales: como se vio previamente, la vegetación se definió como *césped de puna*, por lo que el resto de la cuenca se asigna a este grupo.

Por consiguiente, con esta clasificación, y haciendo uso del cuadro 2.2-3, se obtiene un valor promedio de  $H_{m\acute{a}x} = 147$  mm (tabla 3.4-2), el cual se encuentra dentro del rango típico de 50 – 250 mm (cuadro 2.2-2), por lo que se valida el resultado obtenido.

Uso de suelo	Ar (%)	$H_{m\acute{a}x}$ (mm)
Espacios con poca vegetación	8.78	100
Praderas y pastizales naturales	90.50	150
Cuerpos de agua superficial	0.72	300
		<b>147</b>

Tabla 3.4-2 Cálculo ponderado del  $H_{m\acute{a}x}$  de la cuenca (elab. propia)

### b) Capacidad máxima de infiltración, $I_{m\acute{a}x}$ (mm/mes)

Se definen zonas principales en base a la distribución geológica previamente caracterizada (tabla 3.2-4). En el caso de los estratos volcánicos, dado que sus propiedades se ubican entre una roca volcánica sana y, en menor medida, suelo granular, se pondera a grosso modo sus valores, de acuerdo a su grado de alteración.

Por último, haciendo uso del cuadro 2.2-4, se definen los valores  $I_{m\acute{a}x}$  (tabla 3.4-3).

#	Litología	Ar (%)	$I_{m\acute{a}x}$ (mm/mes)
1	Mat. aluvial de origen indiferenciado	11.25	400
2	Rocas volcánicas - Mat. gravo arenoso	8.78	340
3	Rocas volcánicas - Mat. gravo arenoso	59.02	340
4	Rocas volcánicas - Mat. gravo arenoso	12.86	365
5	Arcosas (Areniscas cuarzosas)	8.09	150
			<b>335</b>

Tabla 3.4-3 Cálculo ponderado del  $I_{m\acute{a}x}$  de la cuenca (elab. propia)

El resultado cae dentro del rango de 100 – 400 mm/mes, especificado por Témez, por lo que se acepta el valor de  $I_{m\acute{a}x} = 335$  mm/mes.

### c) Coeficiente de agotamiento del acuífero $\alpha$ (1/mes)

Se calcula con la fórmula de Lutz Scholz para cuencas de puna (ec. 2.2-1):

$$\alpha = -0.00252(\ln 2.69) + 0.030 = 0.0275 \text{ día}^{-1} = \mathbf{0.825 \text{ mes}^{-1}}$$

El valor cae dentro del rango de DHI (0.005 – 0.10 día<sup>-1</sup>), lo que valida el cálculo.

### d) Coeficiente de inicio de excedencia, C (adimensional)

Según lo indicado en el cap. 2.2.2 por Témez, para propósitos de diseño, en la práctica se considera que  $C = 0.30$ .

## 3.4.3 GENERACIÓN DE CAUDALES SINTÉTICOS

Tomando como base la planilla complementaria del Manual de pequeñas presas del Uruguay<sup>17</sup>, se le adapta al proyecto, y se ejecutan los *Algoritmos de simulación del escurrimiento de Témez*, detallados en el cap. 2.2.1, con los cuales se obtienen los volúmenes de escurrimiento.

Ya que la simulación comienza al inicio del año hidrológico (Septiembre), se asume que los almacenamientos subsuperficial y subterráneo se encuentran vacíos, por lo que las condiciones iniciales  $H_0$  y  $V_0$  son cero. Luego, dado que el primer año de simulación (1982-83) es muy

<sup>17</sup> Se puede revisar el original en <https://mvotma.gub.uy/component/k2/item/10003003-manual-de-diseño-y-construcción-de-pequeñas-presas>

dependiente de las condiciones iniciales (ver cap. 2.2), se le excluye de la serie histórica del escurrimiento (tabla 3.4-4). Finalmente, con los resultados restantes, se determina que el volumen de escurrimiento anual promedio de la cuenca es  $0.85 \text{ Hm}^3$  ( $Q_{\text{prom}} = 27.5 \text{ l/s}$ ).

Columna		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
i		ETPi	Precip	$\delta_i$	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3
1983	5	89.6	24.5	234.11	43.36	0.00	0.00	26.92	0.00	0.00	10.44	13.38	13.38	0.04
1983	6	79.8	0.7	226.79	44.10	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	4.58	5.87	5.87	0.02
1983	7	86.7	0.2	233.66	44.10	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	2.01	2.57	2.57	0.01
1983	8	97.8	19.1	244.80	44.10	0.00	0.00	19.10	0.00	0.00	0.88	1.13	1.13	0.00
1983	9	104.3	96.4	251.31	44.10	10.52	0.00	85.83	10.20	0.32	7.14	3.94	4.26	0.011
1983	10	119.0	28.6	266.03	44.10	0.00	0.00	28.62	0.00	0.00	3.13	4.01	4.01	0.011
1983	11	120.5	22.4	267.48	44.10	0.00	0.00	22.43	0.00	0.00	1.37	1.76	1.76	0.005
1983	12	117.5	218.2	264.46	44.10	76.82	23.89	117.46	62.49	14.33	41.97	21.89	36.22	0.097
1984	1	106.1	110.6	229.16	36.93	20.40	8.01	106.05	19.22	1.17	31.12	30.07	31.25	0.084
1984	2	95.6	355.7	234.60	41.70	194.51	73.59	95.61	123.06	71.45	95.10	59.08	130.53	0.351
1984	3	99.4	299.4	172.80	22.02	179.69	93.90	99.39	116.96	62.73	119.10	92.96	155.69	0.419
1984	4	89.4	108.5	142.48	15.93	39.13	73.93	89.38	35.04	4.09	75.39	78.75	82.84	0.223
1984	5	86.0	7.1	159.02	21.92	0.00	0.00	80.99	0.00	0.00	33.04	42.35	42.35	0.114
1984	6	75.5	11.5	222.52	44.10	0.00	0.00	11.54	0.00	0.00	14.48	18.56	18.56	0.050

Tabla 3.4-4 Extracto de planilla de cálculo del escurrimiento (elab. propia)

Posteriormente, se compara la precipitación y los caudales generados a escala mensual (gráfico 3.4-2), en la cual es notoria la correspondencia temporal entre los picos máximos. Además, se observa que gran parte del escurrimiento se concentra en solo cuatro meses (Enero – Abril), por lo que para una mejor interpretación de la variable, se grafica el volumen generado en esta época de crecidas, y la época seca (resto del año), en la cual se aprecia visualmente las proporciones relativas año a año (gráfico 3.4-3), y desde la cual se determina que la época húmeda genera casi el 80% del escurrimiento total (planillas de Excel en anexo IV).

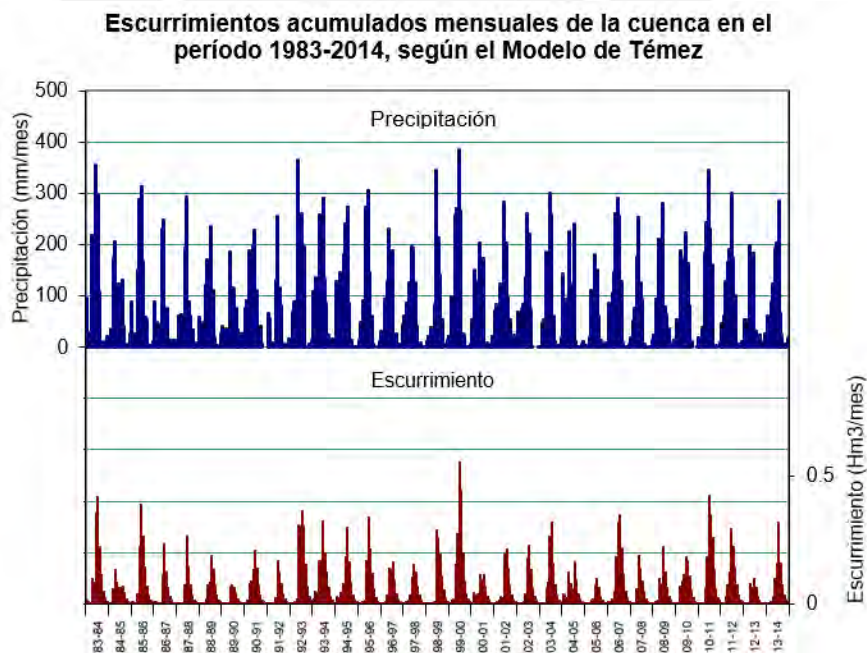


Gráfico 3.4-2 Comparación entre precipitación y escurrimiento a nivel mensual (elab. propia)

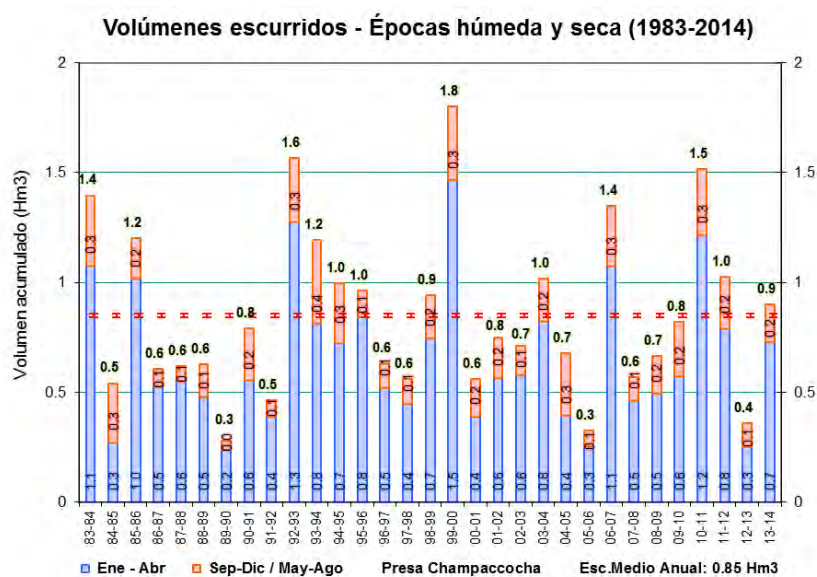


Gráfico 3.4-3 Proporción del escurrimiento por épocas del año (elab. propia)

## 3.5 DIMENSIONADO DEL VOLUMEN DE EMBALSE

### 3.5.1 MODELADO BIM DE LA REPRESA

La determinación del volumen óptimo del embalse es un proceso iterativo (cap. 2.3.2), por lo que inicialmente se comienza el análisis para la altura máxima de una pequeña presa: 15 m. desde su cimentación. Posteriormente, se analiza la sensibilidad del modelo con la altura.

Luego, se procede al modelado BIM -Building Information Model- de la represa con Civil 3D.

### Cimentación y excavación previa

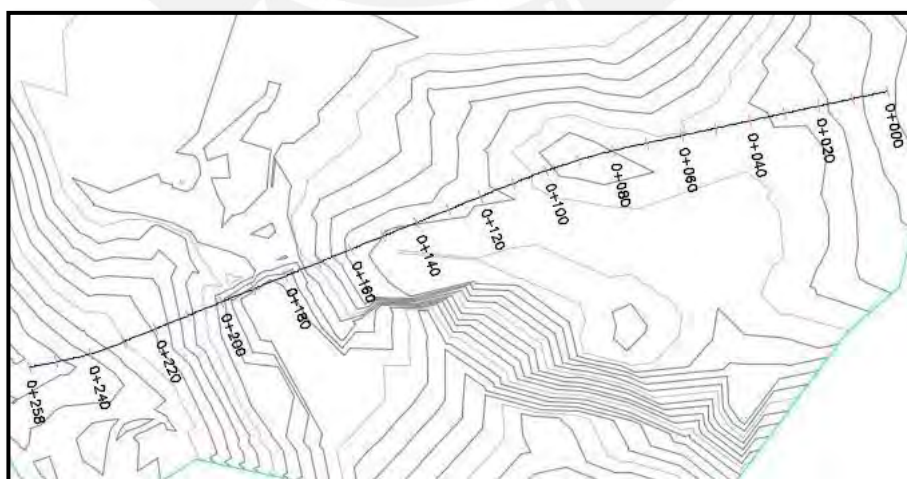


Figura 3.5-1 Alineamiento en planta de futura represa en Civil 3D (elab. propia)

Antes de iniciar la conformación de la presa, se deben retirar las capas que no cumplen con las condiciones de ingeniería propicias para servir como estratos de cimentación de la presa.

De acuerdo a los perfiles correlacionados (tabla 3.2-4), y tomando en cuenta los lineamientos del cap. 2.3.1, en el primer estrato se encuentran depósitos aluviales recientes, los cuales al estar semi-consolidados, presentan malas propiedades geomecánicas e hidrogeológicas, además de albergar en su superficie capas de suelo orgánico, por lo cual, dada su relativa poca profundidad, esta capa será removida en su totalidad de la zona de actuación de la presa.

Por otro lado, el siguiente estrato de roca fracturada se considera adecuado con fines de capacidad portante, sin embargo, aun permite filtraciones moderadas hacia el exterior de la presa, por lo que se instalará una zanja de impermeabilización total que penetrará en la capa hasta encontrar la arenisca y asegurar la estanqueidad del embalse.

Con motivo de demarcar el área de actuación, se realiza el trazado (fig. 3.5-1) del eje de la futura represa (L = 258 m.), en donde mediante una breve inspección visual se puede encontrar intuitivamente la ubicación de la presa artesanal actual (PK 180 - 200), mencionada en el cap. 3.1. En este lugar en especial se ha presentado el mayor espesor de la capa aluvial respecto de las demás regiones del alineamiento, debido a que es la zona de fondo de valle por donde se concentra el escurrimiento, transportando y depositando (por el efecto de la presa artesanal) mayores cantidades de sedimentos, razón por la cual se realiza una distinción entre los sectores existentes, y se les separa entre “zona de fondo” al emplazamiento de la presa actual, y “zona de ladera” a todas las demás regiones. En base a los perfiles geofísicos, la distribución de las profundidades de los estratos según el tipo de zona se resume en la tabla 3.5-1.

Zonas	Profundidad Máxima (m)		
	Aluvial	Roca fracturada	Arenisca
Fondo	2.00	4.00	Resto
Ladera	1.50	4.00	Resto

**Tabla 3.5-1** Profundidades máximas de los estratos existentes (elab. propia)

Por otro lado, como es evidente, en la *zona de fondo* se encuentra el mayor desnivel topográfico entre ambos lados del eje, además de la menor cota a la que podría proyectarse la nueva presa. Precisamente, la altura de una represa se considera desde la cota más baja de la cimentación, por lo que este sitio en específico es crítico para el diseño de ingeniería.

Mediante el uso del software Autocad Civil 3D e importando como *data reference* la superficie topográfica usada en el cap. 3.2, se realiza un corte transversal al eje de la actual presa artesanal (fig. 3.5-2) para tener referencia de los niveles que condicionarán el pre-dimensionamiento.

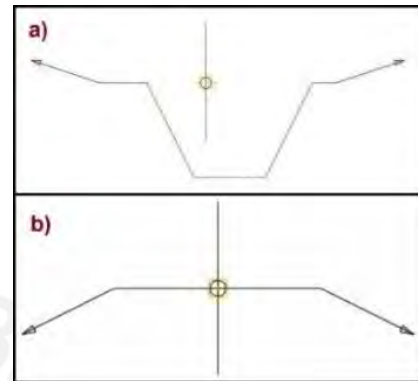
Como se observa, la cota más baja en la zona de actuación es poco mayor a 4410 msnm, por lo que considerando además los 2 m. de profundidad que se remueven del estrato aluvial por los motivos antes expuestos, entonces la cota de cimentación de la presa se define en 4408

msnm. Asimismo, asumida la máxima altura que puede tener una pequeña presa (15 m.), la cota de coronamiento queda definida en 4423 msnm.

Por otro lado, realizando el proceso iterativo mediante el cual se aproximan los derrames de la presa para definir la sección de fondo, se estima una base de 30 m. a cada lado, con un talud de corte hacia la superficie de 3:1.



**Figura 3.5-2** Perfil topográfico de presa artesanal actual en Civil 3D (elab. propia)



**Figura 3.5-3** Secciones de a) excavación en zona ladera y b) represa (elab. propia)

Finalmente, la zanja de impermeabilización se ubica 1 m. aguas arriba del eje de la presa, y en ambos casos penetra 4 m. a partir de la cota de cimentación, por lo que suponiendo 1 m. aprox. de borde libre en la presa, la carga de agua es 14 m. en la sección de fondo, y 7 m. en promedio en la sección de ladera, por lo que el ancho inferior de las zanjas (ec. 2.3-1) son:

**Sección Ladera**  $\rightarrow W = 7 - 4 = 3$  m.

**Sección Fondo**  $\rightarrow W = 14 - 4 = 10$  m.

## Pre – Dimensionamiento y modelamiento de la represa

Una vez realizada la excavación, se procede a la proyección de la represa, para lo cual se definen las dimensiones haciendo uso de los lineamientos del cap. 2.3.1.

En primer lugar, se realiza el cálculo del ancho de corona mediante la fórmula del *Bureau of Reclamation* (ec. 2.3-2):

$$A = \frac{15}{5} + 3 = 6 \text{ m}$$

Además, debido a la zanja de impermeabilización total proyectada, el núcleo central adopta la geometría estándar del denominado **núcleo mínimo A** (fig. 2.3-4). Esto hace que ambos taludes sean independientes del tipo de material utilizado, por lo que los dos se fijan en 2:1.

Las secciones típicas, así como los perfiles longitudinales de los cortes de la excavación previa y el alineamiento longitudinal de la futura represa, superpuestos con el terreno natural actual, se observan en la fig. 3.5-3 y fig. 3.5-4, respectivamente. Una vez creado el *TIN* de la represa, se calcula un volumen de obra construida de aprox. 30,000 m<sup>3</sup>. Finalmente, la topografía con la presa en la zona de influencia del embalse se muestra en vista 3D (fig. 3.5-5).

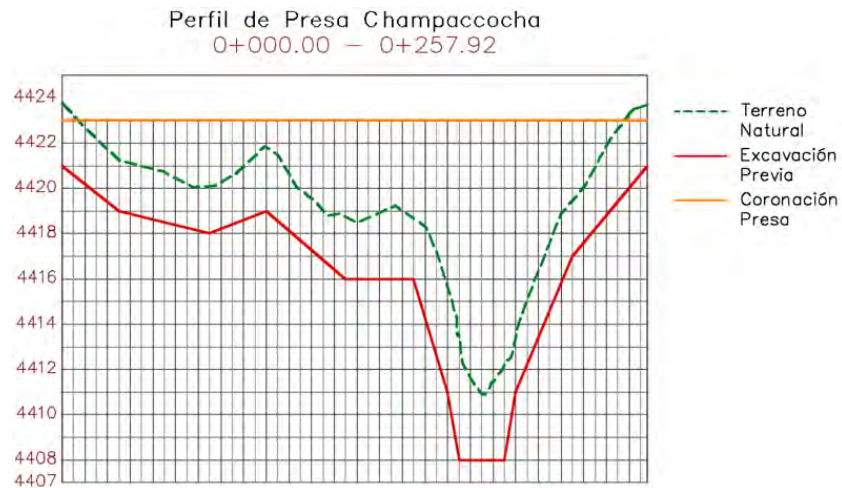


Figura 3.5-4 Perfiles longitudinales de excavación y corona de represa en Civil 3D (elab. propia)



Figura 3.5-5 Visualización 3D de terreno con la presa en su zona de influencia (elab. propia)

### 3.5.2 CURVA DE CAPACIDAD DEL EMBALSE

Para determinar las dimensiones del embalse, se limita la topografía del vaso hasta la cota de coronamiento (4423 msnm), por el lado donde se produce el almacenamiento. Luego, se realiza una clasificación de elevaciones cada 1 m (fig. 3.5-6).

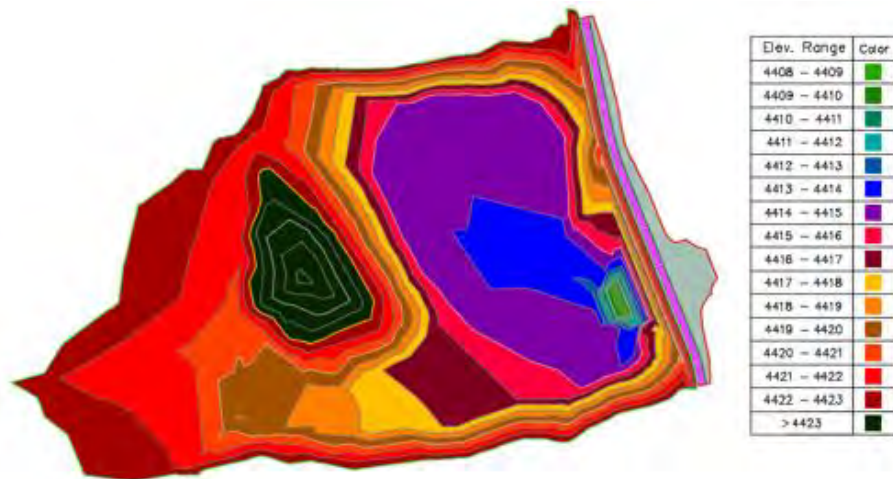
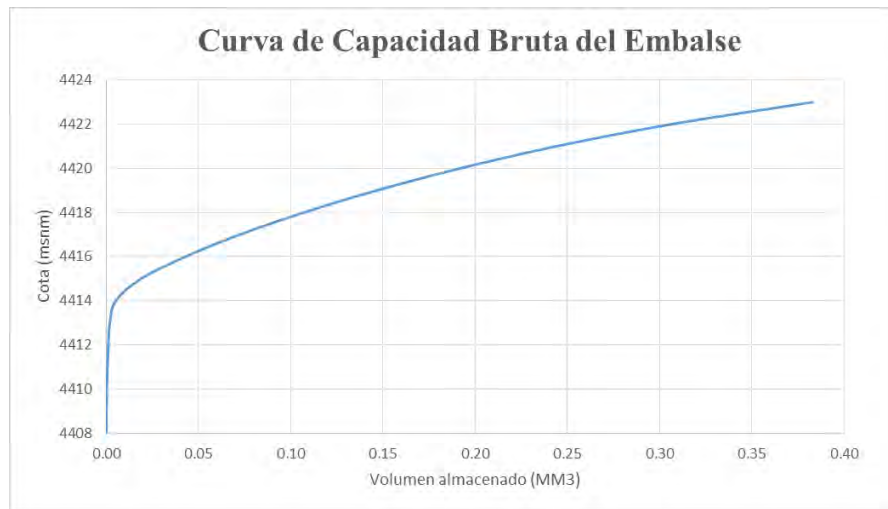


Figura 3.5-6 Clasificación por elevaciones del vaso de la represa (elab. propia)

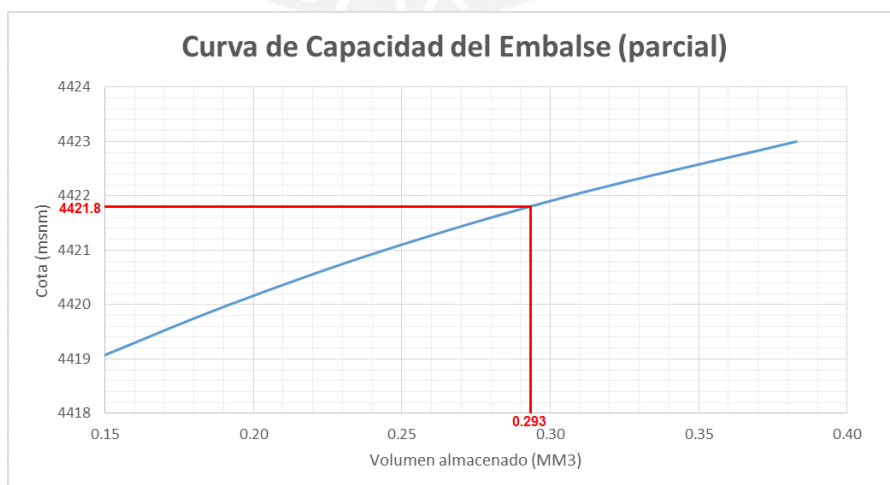
A partir de lo anterior, se obtiene una tabla con las áreas parciales entre curvas de nivel (ver anexo IV), con la cual obtener las curvas cota-área-volumen, y así finalmente definir la curva de capacidad del embalse en *Millones de Méetros Cúbicos -MM3-* (gráfico 3.5-1).



**Gráfico 3.5-1** Curva de capacidad bruta del embalse (elab. propia)

Sin embargo, la curva hace referencia al volumen total del embalse, por lo que para obtener el almacenamiento útil es necesario descontar el volumen muerto y el volumen de contingencias. El primero se desarrolla en el siguiente capítulo, mientras que el segundo se determina mediante el criterio del *Bureau of Reclamation* descrito en el cap. 2.3.1.

Así entonces, dado que el espejo de agua en la cota de coronamiento no pasa de los 400 m., se determina que para un *Fetch* máximo menor de 1.6 km., según el cuadro 2.3-3 corresponde un resguardo de 1.20 m, lo que posiciona la cota de inicio de vertido en los 4421.8 msnm, formando un espejo de agua máximo en el embalse de 6.64 Ha. Esto último define hasta estas instancias la capacidad máxima del embalse en 0.293 MM3 (gráfico 3.5-2).



**Gráfico 3.5-2** Determinación del volumen del embalse por debajo del borde libre (elab. propia)

## 3.6 EVALUACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE

### Erosión eólica

Previamente, se presentó el mapa eólico del Perú para velocidades medias anuales del viento a distintas alturas (fig. 2.4-4), sin embargo, los valores de fuerza eólica más desfavorables se presentan en el mes de Julio. Por lo tanto, mediante el uso del aplicativo web-GIS del MINEM (fig. 3.6-1), se determina que la máxima velocidad media mensual erosiva del viento, oscila entre los 4.25 m/s ( $h=10$  m) y los 7.13 m/s ( $h=150$  m). Según la escala de Beaufort (cuadro 2.4-1), dichas velocidades califican como viento leve y moderado, lo que expresa que no hay potencial erosivo significativo, por lo tanto, no es necesario el cálculo de erosión eólica.

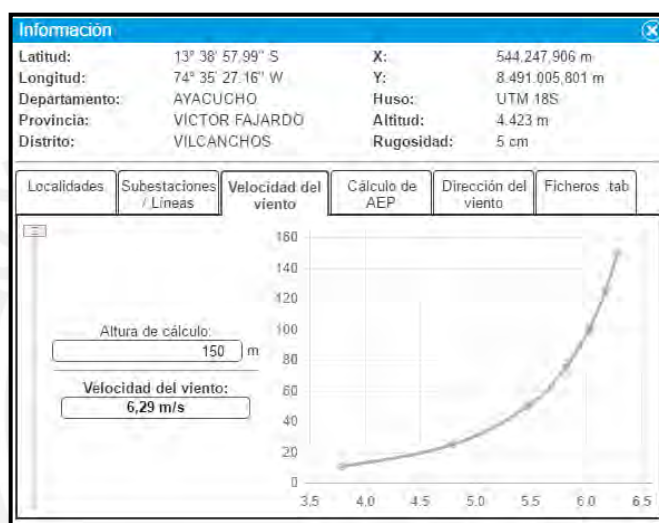


Figura 3.6-1 Vista del aplicativo que muestra el aumento de la velocidad media del viento con la altura ([http://mapas.minem.gob.pe/map\\_eolico/](http://mapas.minem.gob.pe/map_eolico/), MINEM, 2016)

### 3.6.1 CÁLCULO DE LA EROSIÓN EN LA CUENCA

#### Estimación de los factores USLE

##### Factor R

La fórmula de Morgan está compuesta por la  $P_{media}$  anual, la  $I_{30}$  y la energía cinética (EC). La primera se obtuvo en el cap. 3.3.4 ( $P_{media} = 1033.01$  mm). Por otro lado, para determinar la intensidad de lluvia en 30 minutos, se hizo uso de las curvas IDF IILA-SENAMHI-UNI (fig. 3.6-2), con lo cual se determina que la  $I_{30}$  para un TR = 2 años de la zona de estudio es 18.1 mm/h. Los cálculos realizados para obtener la curva IDF se presentan en el anexo I.

Tal como se explica con mayor detalle en el cap. 3.9, el SENAMHI concluye que para la sierra central (zona del proyecto) no se han presentado variaciones significativas en los últimos 40 años, ni se proyectan grandes cambios con miras hacia el año 2030. Por lo tanto, al menos para el caso del área de estudio, el método IILA-SENAMHI-UNI está totalmente vigente en la

actualidad y para las proyecciones futuras, en donde incluso se puede tomar como un criterio conservador, dado que sobreestimaría las intensidades máximas.

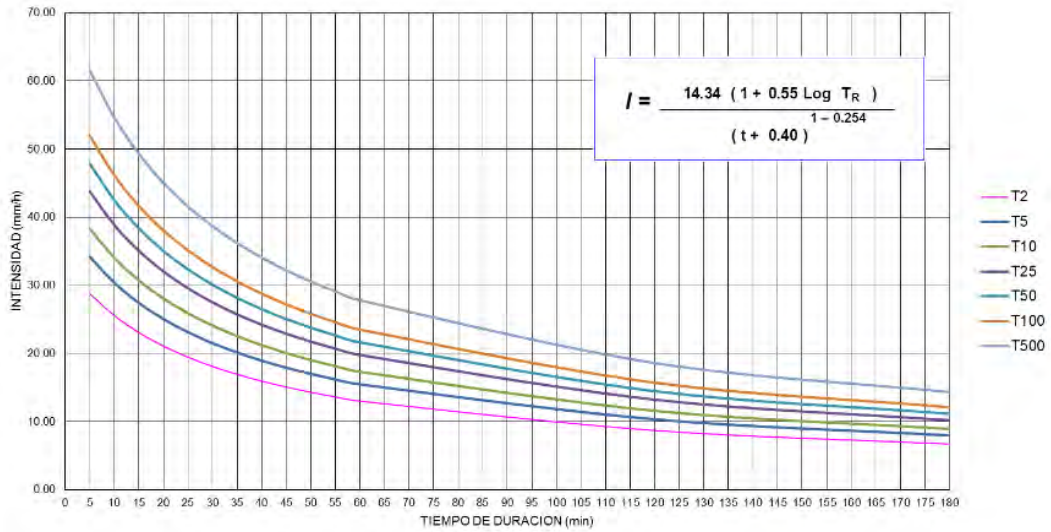


Figura 3.6-2 Curvas IDF Champacocha por método IILA-SENAMHI-UNI (elab. propia)

El parámetro restante, la energía cinética, se calcula con la fórmula de Van Dijk (ec. 2.4-2):

$$EC = 0.283(1 - 0.52e^{-0.042*18.1}) = 0.2142$$

Finalmente, se aplica la ecuación de Morgan (ec. 2.4-1) para determinar R:

$$R = (EC * P_a * I_{30}) / 100 = (0.2142 * 1033.01 * 18.1) / 100 = 40.05 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

### Factor K

Haciendo uso de la tabla 3.2-4, y mediante el criterio del ARS (cuadro 2.4-2), se determina la erodabilidad K en base a la clase textural USDA y el porcentaje de materia orgánica, del estrato superficial de cada zona principal (tabla 3.6-1). Cabe resaltar que se consideran aparte las superficies de agua (donde K=0, ya que por obvias razones no hay erosión sobre agua).

Por otro lado, aunque de forma exacta el espejo de agua de la laguna Champacocha debe ser reemplazado por el del embalse (que es variable), esta modificación no tiene mayor relevancia, por lo que se decide mantener la definición inicial de los cuerpos de agua superficial.

#	Clase Textural USDA	% MO	K (US)	K (SI)
1	Franco	2.16	0.34	<b>0.045</b>
2	Franco arenosa	1.40	0.25	<b>0.033</b>
3	Franco arcillosa	3.95	0.21	<b>0.028</b>
4	Franco arcillosa	3.95	0.21	<b>0.028</b>
5	Franco arcillo - arenosa	0.97	0.26	<b>0.034</b>
x	Embalse y lagunas	---	---	<b>0</b>

Tabla 3.6-1 Resumen del cálculo del factor K de cada estrato superficial (elab. propia)

## **Factor C**

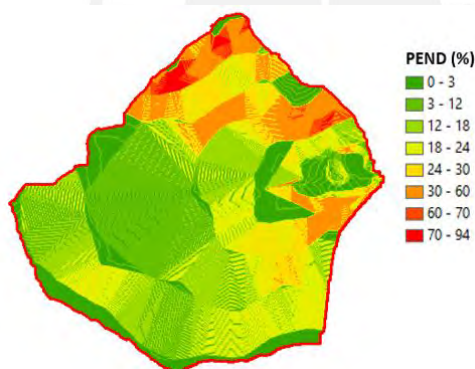
Este valor se estima mediante el cuadro 2.4-3, y se distribuye de forma muy similar al parámetro  $H_{\text{máx}}$ , del apartado de simulación del modelo de Témez. Se define a la extensión sobre la capa geológica No. 2 (Fm. Portuguesa) como territorio con cubierta escasa, y al resto del área de suelo como pradera herbácea (nuevamente, para cuerpos de agua superficial  $C=0$ ).

<b>Cultivo y Práctica</b>	<b>C</b>
Cubierta escasa (60%)	<b>0.10</b>
Pradera herbácea en buenas condiciones	<b>0.01</b>
Embalse y lagunas	<b>0</b>

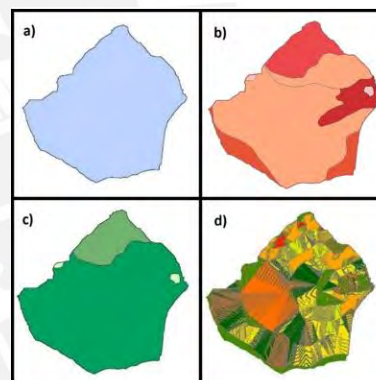
**Tabla 3.6-2** Valores del factor C en la cuenca (elab. propia)

## **Factor LS**

Utilizando la capa ráster de la topografía previamente generada en el cap. 3.2.1, y mediante las herramientas – comandos del *Spatial Analyst Tools* de ArcGIS, se crea primero el mapa de pendientes de la cuenca (fig. 3.6-3), y luego se reclasifica en grupos discretizados siguiendo los rangos establecidos en el cuadro 2.4-4 (el límite superior del último rango no es 100%, sino la máxima pendiente encontrada, 94%).



**Figura 3.6-3** Mapa de pendientes por rangos en la cuenca (elab. propia)



**Figura 3.6-4** Mapas parciales USLE a) Factor R, b) Factor K, c) Factor C, y d) Factor LS (elab. propia)

Siguiendo con el geoprocésamiento, se convierte el mapa a capa vectorial y se agrupan los polígonos de igual categoría. Luego, se agrega el valor correspondiente a cada rango de pendientes para finalmente obtener el mapa del factor LS.

Una vez definidos todos los parámetros, se crean los mapas de los cuatro factores (no es necesario un mapa del factor P, ya que se había definido previamente como 1, dado que es una cuenca natural), los cuales se muestran en la fig. 3.6-4.

## **Cálculo de la pérdida total de suelo**

Posteriormente, se combinan los mapas anteriores y se obtiene el mapa de pérdida de suelo promedio anual por área unitaria, en  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$  (fig. 3.6-5).

De este modo, ya que todos los valores son menores a  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , según la escala de clasificación FAO-PNUMA-UNESCO (cuadro 2.4-5), la erosión producida en la cuenca es de nula a ligera. Asimismo, se obtiene el valor total de la pérdida de suelo acumulando los productos parciales de las pérdidas de suelo, multiplicadas por sus áreas en hectáreas. Finalmente, la erosión bruta de la cuenca se calcula en  $66.96 \text{ t/año}$ .

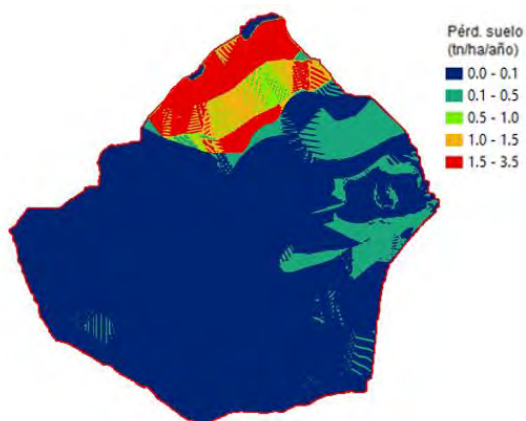


Figura 3.6-5 Mapa final USLE de la cuenca (elab. propia)

### Determinación del aporte neto de sedimentos

En primera instancia, mediante el uso del ábaco de la fig. 2.4-9, y con un área de cuenca aportante de  $2.69 \text{ km}^2$ , se obtiene que el coeficiente de entrega de sedimentos (CES) es aproximadamente 54%, por lo que el aporte neto de sedimentos (definido en cap. 2.4.2) es:

$$AS = 66.96 * 54\% = 36.16 \text{ t/año}$$

### 3.6.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN MUERTO

#### Retención de sedimentos en el reservorio

Tal como se definió en el cap. 3.5.2, el volumen restante del embalse sin el borde libre queda en  $0.293 \text{ MM}^3$ . Por lo tanto, la proporción neta de los sedimentos que retiene el embalse, representada en la eficiencia de atrape, es calculada mediante la fórmula de Brown (ec. 2.4-3):

$$\eta_A = 1 - \frac{1}{1 + 0.1 * (2.1 * 10^3) * \left(\frac{0.293}{2.69}\right)} = 0.958$$

Consecuentemente, el peso neto de sedimentos retenidos en el embalse, es:

$$W = AS * \eta_A = 36.16 * 0.958 = 34.6 \text{ t/año}$$

#### Determinación del volumen muerto

Se considera la vida útil de la presa en 50 años (cap. 2.4.3), y una operación del embalse con descensos de normales a moderados. Luego, se caracteriza el sedimento arrastrado, para lo cual se ponderan los porcentajes de arena, limo y arcilla en los cinco estratos superficiales de

la cuenca, obtenidos desde la tabla 3.2-4. Posteriormente, con estos porcentajes promedio se ponderan los parámetros de la fórmula de Miller, y, haciendo uso del cuadro 2.4-6, se obtiene que  $\delta_o = 1241$  y  $K = 41$  (tabla 3.6-3).

% \ #	1	2	3	4	5	Prom.	$\delta_o$	K
<b>Arena</b>	35.8	64.5	31.2	31.2	58.9	<b>44.3</b>	1450	0
<b>Limo</b>	39.4	26.2	39.6	39.6	16.2	<b>32.2</b>	1240	29
<b>Arcilla</b>	24.8	9.3	29.2	29.2	24.9	<b>23.5</b>	848	134
							<b>1241</b>	<b>41</b>

% # **Tabla 3.6-3** Cálculo de  $\delta_o$  y K ponderados (elab. propia)

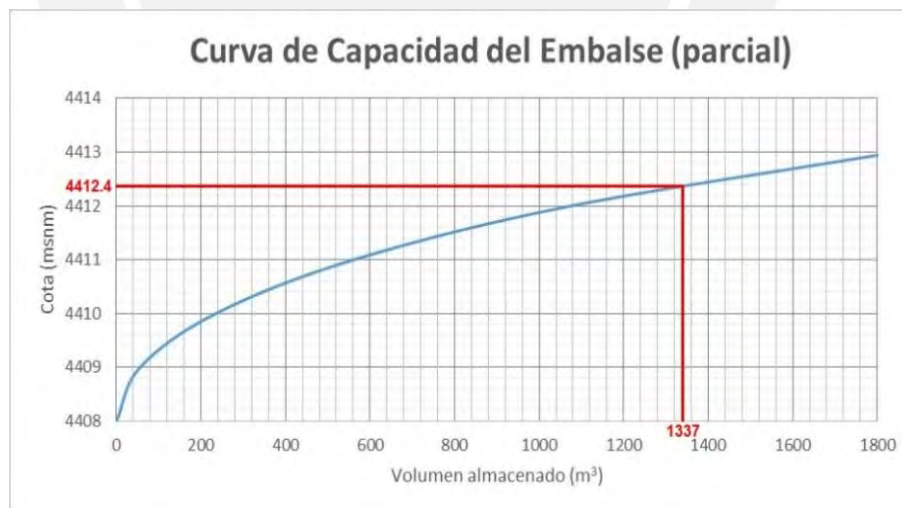
Luego, se determina el peso específico de los sedimentos depositados (ec. 2.4-4):

$$\delta_t = 1241 + 0.4343 * 41 * \left[ \frac{50}{50-1} * \ln 50 - 1 \right] = 1294 \frac{kg}{m^3} = 1.294 \frac{t}{m^3}$$

Por lo cual, el volumen muerto total del embalse en 50 años es:

$$V = \frac{W}{\delta} = \frac{34.6 * 50}{1.294} = 1337 m^3$$

Ya que la configuración de depositación en embalses pequeños es en forma de cuña (ver cap. 2.4.3), es sencillo tabular el volumen ocupado por los sedimentos en la curva de capacidad del embalse para poder hallar el nivel constante al que llegaría en 50 años el depósito de sedimentos, es decir, la cota teórica de volumen muerto por colmatación (gráfico 3.6-1).



**Gráfico 3.6-1** Determinación de cota teórica de volumen muerto por colmatación (elab. propia)

La gráfica marca una cota situada aprox. en 4412.4 msnm, sin embargo, como se indicó en el cap. 2.3.1, el volumen muerto también incluye un pequeño volumen inactivo necesario para que el punto de toma tenga una carga hidráulica mínima que garantice la correcta operación del embalse. Esta altura es mutuamente dependiente del máximo caudal descargado, y la sección del conducto de la toma. Ya que el diseño de estructuras de toma no es objeto de

estudio, se estima apropiado establecer el nivel superior del volumen muerto total en la cota 4415 msnm., y el inicio del punto de toma en la cota 4413 msnm.

Dado que los volúmenes en el embalse recién comienzan a incrementarse significativamente a partir de los 4415 msnm, la capacidad útil del embalse no se ve seriamente afectada.

Finalmente, habiendo sustraído ya el volumen muerto y el de contingencias, se definen las curvas cota-área-volumen<sup>18</sup>, determinando la capacidad útil del embalse (gráfico 3.6-2).

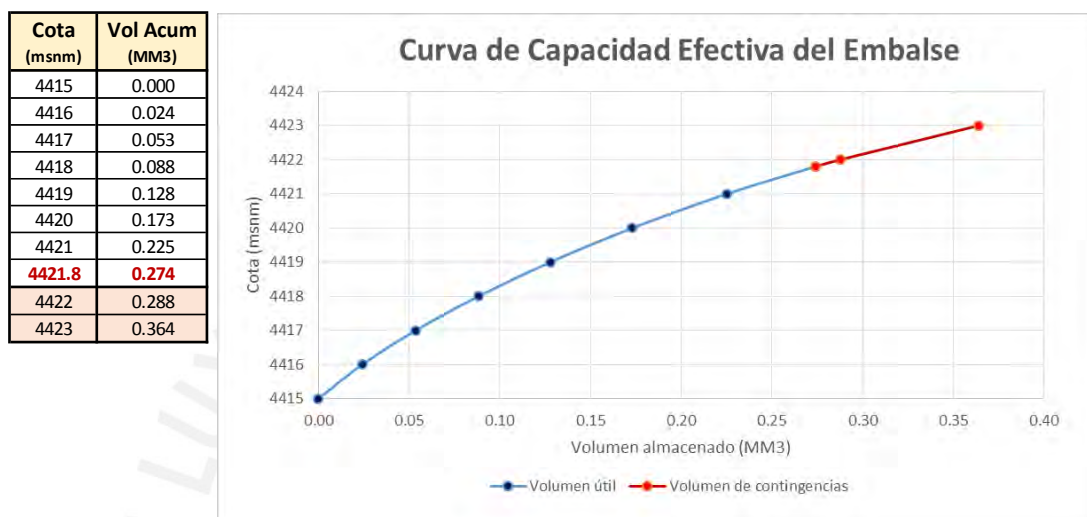


Gráfico 3.6-2 Curva de capacidad efectiva o útil del embalse (elab. propia)

## 3.7 ANÁLISIS DE FILTRACIONES

### 3.7.1 MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

Como es evidente, debido al efecto del embalse se consideran las capas geológicas totalmente sumergidas, actuando como acuíferos, mientras que la presa funcionará parcialmente saturada. Se define el modelo para la máxima capacidad del embalse, según los lineamientos definidos en el cuadro 2.3-1 (materiales constituyentes) y la fig. 2.5-10 (modelamiento numérico).

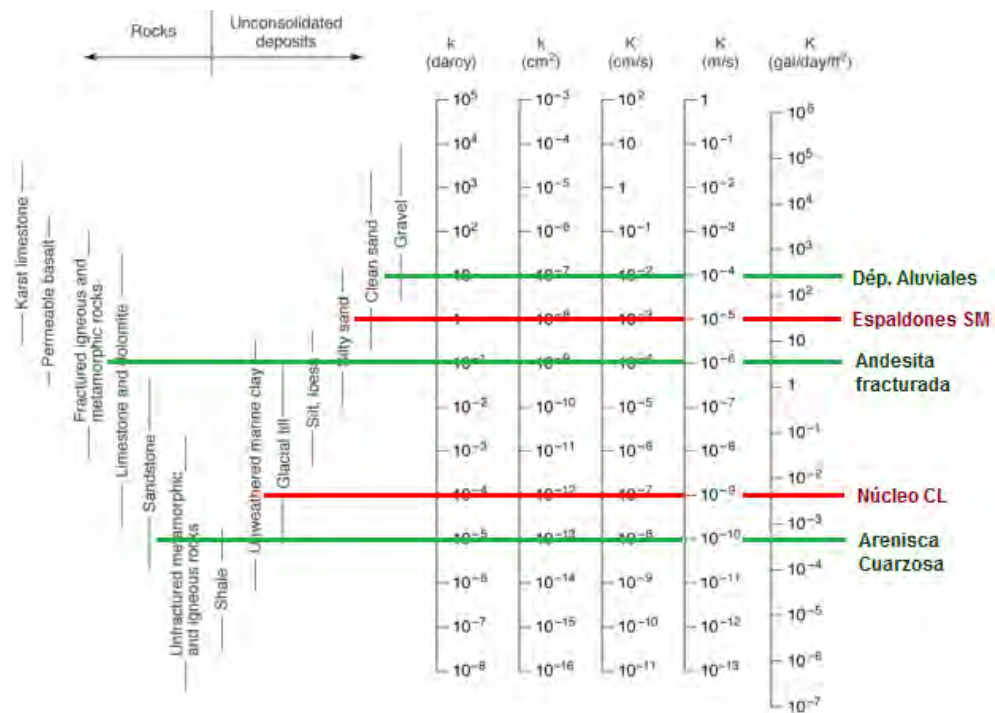
#### Distribución de materiales constituyentes en la presa

- **Núcleo impermeable:** se usa como material constituyente *Arcilla de baja plasticidad (CL)*.
- **Espaldones:** en el caso del cuerpo de la presa, se elige *Arena Limosa (SM)*.
- **Coraza protectora:** dado que el enrocado no aporta a la disipación de la carga hidráulica, y debido a su reducido espesor en comparación al cuerpo de presa (cuadro 2.3-2), se decide con propósitos de reducir la complejidad numérica no incluir al enrocado en el modelo. Sin embargo, se usarán elementos de interface para simular la geomembrana del talud aguas arriba, dada su relevancia como barrera hidráulica.

<sup>18</sup> Ver anexo II para revisar las curvas efectivas cota-área-volumen

- **Drenes:** se considera que el material de cuerpo de presa no es lo suficientemente autodrenante, por lo que se definen geonets -chimenea y horizontal-, los cuales serán modelados como sumideros, con una condición de borde especial de presión cero. Debido al uso de drenes, el espaldón del talud aguas abajo ya no se modela (no contribuye a la disipación de energía), por lo que se le asigna un material tipo nulo (ver fig. 2.5-10).
- **Filtros:** ya que se usan *geotextiles* para controlar la erosión interna, y estos no aportan a la disipación de la energía, tampoco se modelarán.

## Asignación de propiedades hidrogeológicas



**Figura 3.7-1** Rangos típicos de conductividad hidráulica en suelos y rocas del proyecto (elaborado a partir de Freeze & Cherry, 1979)

Teniendo caracterizadas las capas modeladas (estratos geológicos y materiales que componen la presa), con el uso del ábaco de la fig. 3.7-1 se procede a estimar a groso modo la conductividad hidráulica (tabla 3.7-1). En el caso del elemento de interface, se considera de forma conservadora para una geomembrana un  $K = 10^{-11}$  m/s, aunque este material puede llegar a tomar valores tan bajos como  $10^{-14}$  m/s (Koerner, 2005).

		Estratos	K (m/s)	n (%)
Mat. Presa	Núcleo Impermeable		$10^{-9}$	45%
	Espaldones Cuerpo		$10^{-5}$	25%
Capas Geológic.	Dépositos Aluviales		$10^{-4}$	35%
	Andesita fracturada		$10^{-6}$	10%
	Arenisca Cuarzosa		$10^{-10}$	5%

**Tabla 3.7-1** Conductividades hidráulicas y porosidades en estratos modelados (elab. propia)

No se considera plano preferencial de flujo (no hay restricciones por estratos impermeables inclinados), ni anisotropía (sí existe, pero si se especifica un menor valor para  $K_y$ , el caudal sería menor, por lo que para modelar de forma conservadora se establece que  $K_x = K_y$ ).

### 3.7.2 MODELAMIENTO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DE REDES DE FLUJO

#### Construcción del modelo

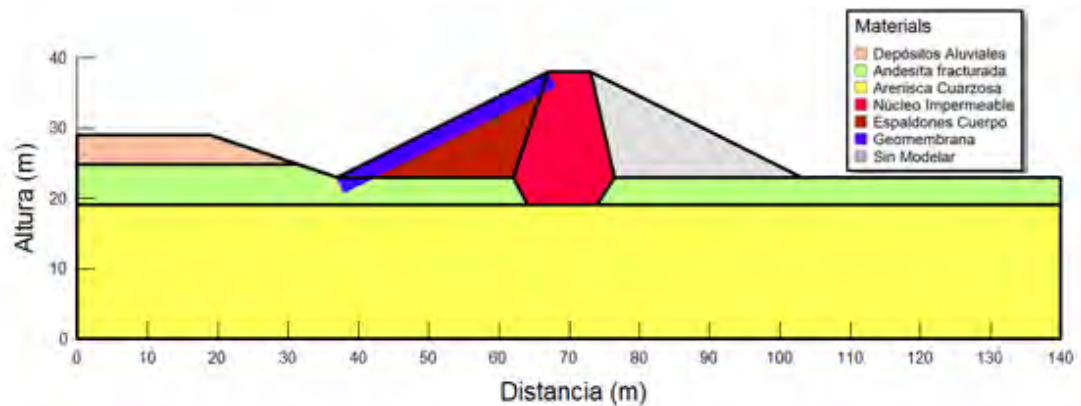


Figura 3.7-2 Distribución de materiales constituyentes del modelo (elab. propia)

Asumiendo que la distribución estratigráfica se mantiene constante a lo largo de la presa, entonces la sección más desfavorable a nivel de vulnerabilidad ante filtraciones es la que recibe mayor carga hidráulica, dado que esta aumenta el gradiente, y este a su vez la velocidad del flujo filtrado (por ley de Darcy). Por consiguiente, se realiza un corte transversal desde Civil 3D en la “zona fondo” (ver apartado 3.5.1), y sobre este se dibuja la distribución de estratos en la presa y su cimentación. Luego, esta geometría creada se exporta hacia Geostudio.

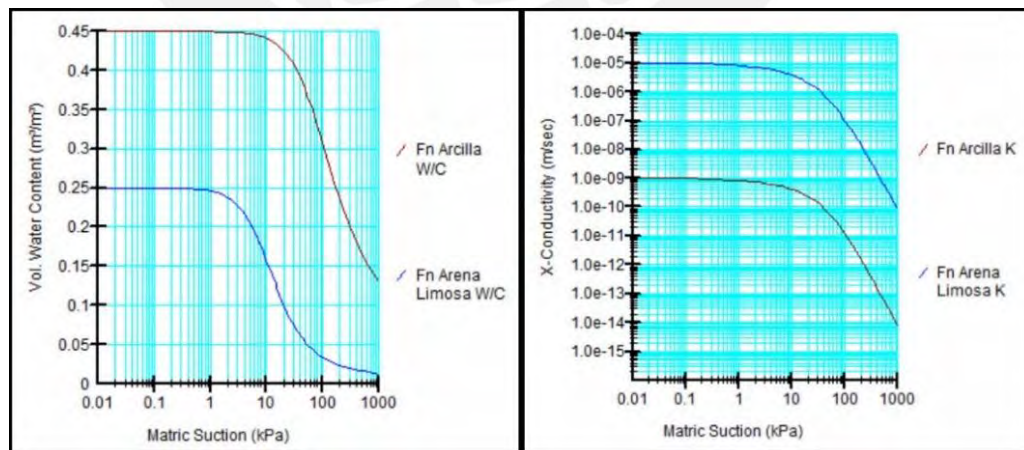
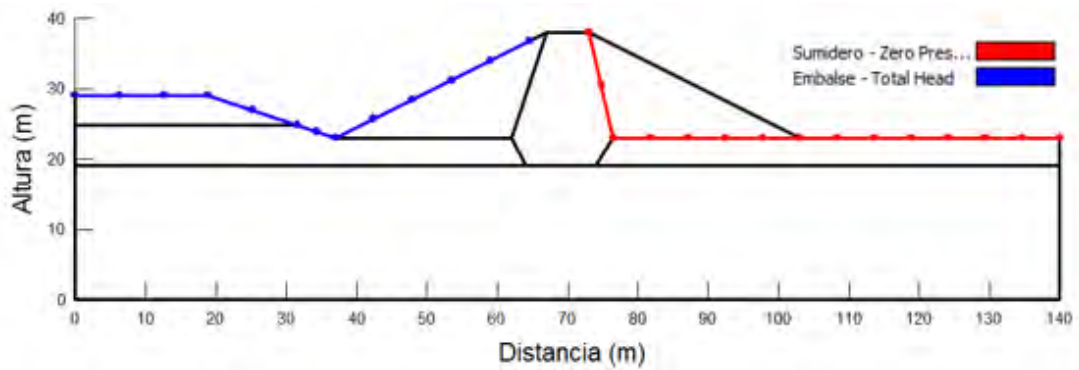


Figura 3.7-3 Funciones de contenido volumétrico y conductividad hidráulica vs succión de poros, correspondientes a la arcilla y la arena limosa (elab. propia)

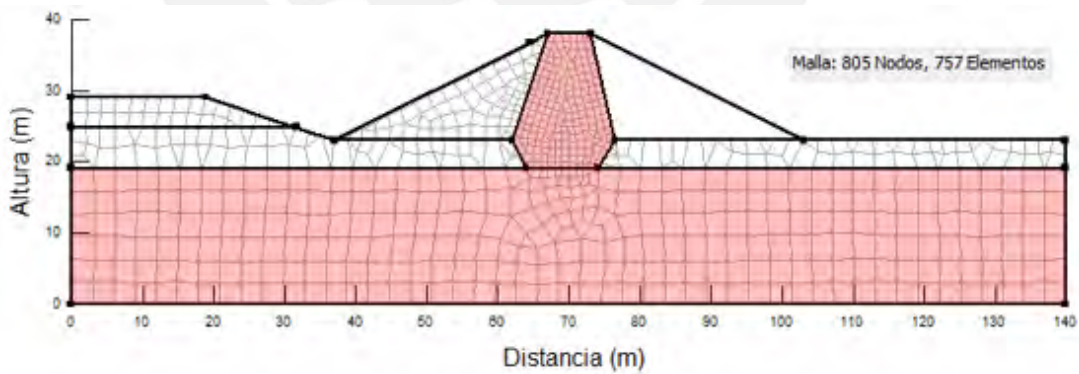
Importadas las dimensiones se proceden a definir los materiales en la presa (fig. 3.7-2). Las capas geológicas adoptan modelos totalmente saturados, por lo que solo son necesarias la porosidad y la conductividad hidráulica saturada de cada estrato, sin embargo, en contraste,

los materiales de la presa se definen con el modelo saturado/no saturado, por lo que se deben definir funciones de contenido volumétrico de agua (W/C) vs succión -presión de poros negativa-, mediante la función aproximada por tipo de material que ofrece SEEP/W, para luego, en base a la forma de estas, y con el método de Van Genuchten, obtener las funciones de conductividad hidráulica vs succión (fig. 3.7-3).



**Figura 3.7-4** Condiciones de contorno definidas en el modelo (elab. propia)

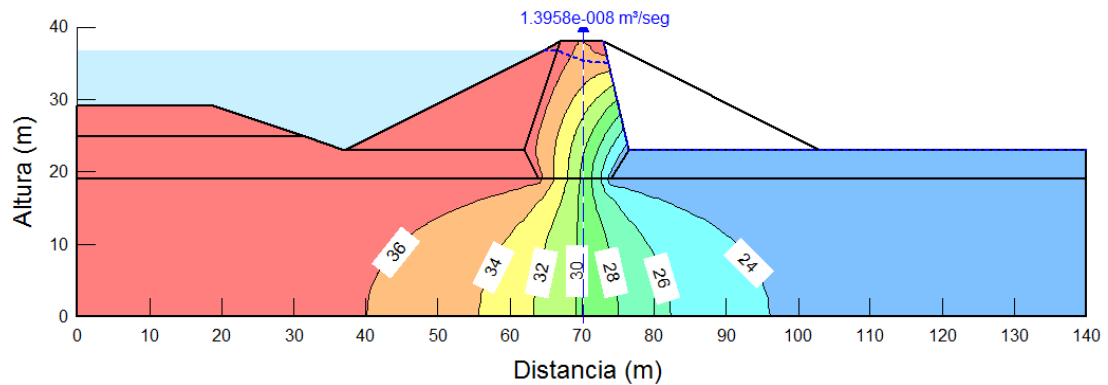
Siguiendo los lineamientos de la fig. 2.5-10, dado que la coronación de la presa se define en coordenadas relativas en la cota 38 m. del modelo, se asigna una condición de contorno de carga hidráulica total constante del NAMO de la presa de 36.8 m (1.20 m de borde libre), aplicada al fondo del vaso y al talud aguas arriba de la presa (fig. 3.7-4). Por otro lado, se asigna una condición de sumidero ( $P=0$ ) al talud aguas abajo del núcleo, y a la base del espaldón aguas abajo, simulando el arreglo de geonets, con el cual se asegura un drenaje total del agua captada (se supone un diseño previo óptimo de las geonets por capacidad drenante). La misma condición de presión cero recibe la superficie aguas abajo de la presa.



**Figura 3.7-5** Distribución de la discretización por tamaño de malla en el modelo (elab. propia)

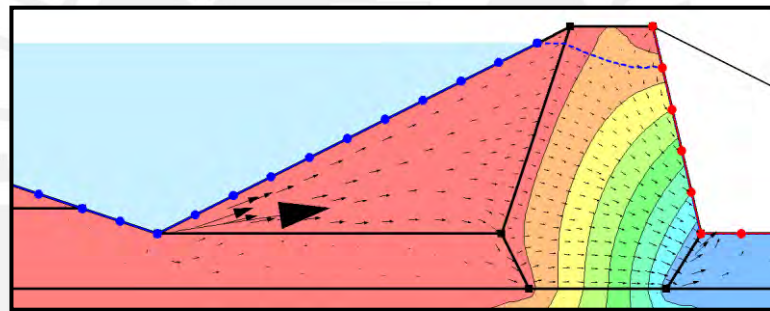
En la discretización del modelo se diferencia el tamaño de malla de los estratos dependiendo de su relevancia en la disipación de la carga hidráulica y el recorrido esperado del flujo (fig. 3.7-5), con los criterios adoptados en el cap. 2.5.2. Con base en lo mencionado, los estratos de mayor y menor importancia son el núcleo y la roca sana, con tamaños de malla de 1 y 3 m. respectivamente. El resto de las capas adoptan un tamaño global de 2 m, excepto el espaldón aguas abajo, que no se malla por estar excluido del modelo (revisar fig. 2.5-10).

## Resultados del análisis de filtraciones



**Figura 3.7-6** Resultados de SEEP/W: líneas equipotenciales, superficie freática y caudal circundante (elab. propia)

Finalmente, se corre el modelo y se obtiene el esquema de líneas equipotenciales, la superficie freática y el caudal circundante (fig. 3.7-6). Debido al uso de geotextiles para evitar la migración de finos, se asume que ya se usaron los mapas de gradientes hidráulicos en su diseño para el control de la erosión interna.



**Figura 3.7-7** Simulación en SEEP/W de los patrones de flujo dentro de la presa (elab. propia)

Por otro lado, mediante un acercamiento de pantalla (fig. 3.7-7) se observan los patrones que siguen las filtraciones dentro de la presa, en donde se advierte que el flujo entra desde la parte inferior del talud aguas arriba, lo cual demuestra el buen funcionamiento de la geomembrana como cubierta impermeabilizante, obligando al flujo a bordearla para poder seguir su camino hacia el núcleo impermeable, el cual disipa casi de forma íntegra la carga hidráulica, para finalmente drenar el caudal hacia las geonets (línea roja). Además, a comparación de las demás zonas de la presa, los vectores de velocidad son casi imperceptibles en el estrato de roca sana, lo cual pone en evidencia la gran barrera hidráulica que supone esta capa geológica.

Finalmente, SEEP/W calcula un caudal circundante de  $1.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$  por metro lineal. Dado que la presa tiene 258 m. de longitud (fig. 3.5-1), entonces el caudal de filtración total es  $3.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Esto supone un volumen anual perdido por filtraciones de aprox.  $113 \text{ m}^3$ , lo que significa el 0.01% del escurrimiento anual de la cuenca, valor que es extremadamente bajo. Esto corrobora la alta efectividad del sistema de impermeabilización empleado.

## 3.8 SIMULACIÓN DE OPERACIÓN DEL RESERVORIO

### 3.8.1 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO

Un caudal ecológico es aquel que se diseña para mantener un nivel de funcionalidad biológica suficiente que asegure la continuidad de los procesos y las comunidades naturales existentes tanto en la ribera como en el medio acuático (Almagro et al., 2003, citado por Alcázar, 2007).

Artículo 5.- Criterios Generales para determinar los caudales ecológicos	
5.1	<b>Caudal ecológico mínimo</b> El caudal ecológico mínimo será el equivalente al caudal determinado al 95% (noventa y cinco por ciento) de persistencia en el punto de interés de la fuente natural de agua.
5.2	<b>Serie histórica a analizar</b> El estudio de determinación de caudales ecológicos se realiza utilizando información estadística de los últimos 20 años. A falta de información, esta será generada utilizando el modelamiento hidrológico y estocástico.

Cuadro 3.8-1 Extracto de la metodología de para determinar caudales ecológicos (ANA, 2016)

La ANA en su metodología oficial para determinar caudales ecológicos, en el caso de proyectos pequeños, que en general no afectan de forma muy significativa al régimen hídrico regional, fija criterios simplificados (cuadro 3.8-1) en los cuales considera la variabilidad mensual mediante la generación de una curva de variación estacional de caudales ecológicos.

### Curva de duración de caudales (CDC)

La curva de persistencia es una gráfica muy usada en estudios previos de aprovechamiento de un recurso hídrico, ya que muestra el porcentaje de tiempo en el que un cierto valor de caudal es igualado o excedido; debido a esto, se usa como método hidrológico para la definición del caudal ecológico (Fatorelli, 2011). Se genera en base a la distribución de Weibull, la cual es considerada en la literatura como una probabilidad de excedencia imparcial (ITIA, 2010).

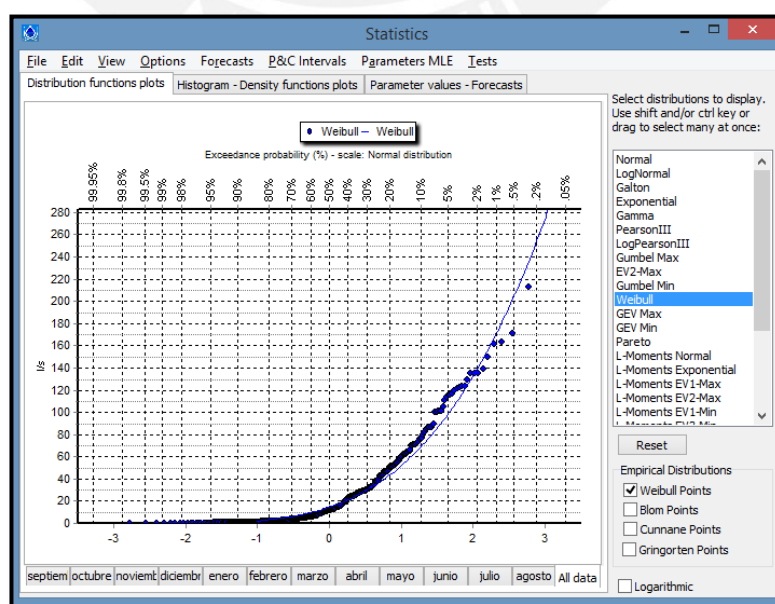


Figura 3.8-1 Representación de la distribución de Weibull para la serie histórica total (elab. propia)

Debido a la pequeña magnitud de los caudales de escurrimiento generados, se trabaja en l/s. Exportando estas cantidades a Hydrognomon, se usa su módulo *Pythia* para aplicar el análisis estadístico. De forma automática la serie mensual de escurrimientos es procesada y se pueden elegir tanto las funciones de distribuciones teóricas (Gumbel, Log-Pearson tipo III, etc.), como los puntos generados de las distribuciones empíricas (Blom, Gringorten, etc.), con los que son comparados. Naturalmente, se elige la distribución de Weibull en los dos grupos y se observa gráficamente el muy buen ajuste que presenta (fig. 3.8-1).

En el anexo II, se puede encontrar la *función de densidad de probabilidad*, la cual no es otra que la curva de persistencia de la muestra.

### Curva de variación estacional de caudales ecológicos

Las gráficas previas corresponden al uso de toda la data existente histórica, sin embargo, para cumplir el criterio de la ANA se ajusta una curva de distribución de Weibull para cada mes del año. Para verificar la idoneidad del ajuste se ejecuta la prueba de Kolmogorov - Smirnov a los 3 niveles de significancia estándar (1%, 5% y 10%), en cada uno de los doce grupos. En todos los casos la hipótesis nula es aceptada, incluso en algunos meses con niveles de significancia de ajuste alcanzados de casi 100% (tabla 3.8-1).

Una vez confirmada la validez del ajuste, se procede a obtener el valor correspondiente al 95% de excedencia de cada mes con la opción de pronósticos *-Forecasts-* (tabla 3.8-2).

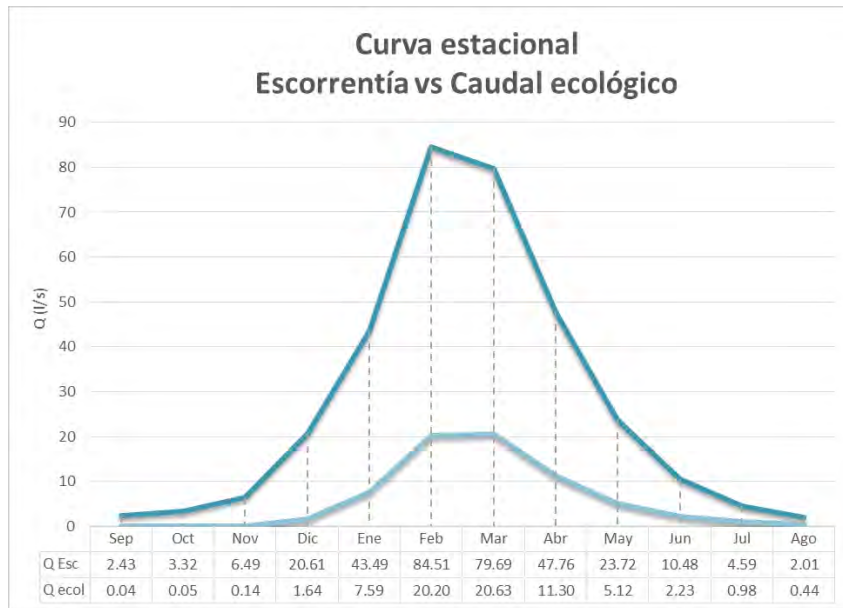
Distribution functions plots	Histogram - Density functions plots			Parameter values - Forecasts	
Kolmogorov-Smirnov test for: febrero	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.8415%	0.08899
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.9961%	0.08868
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	67.6266%	0.12265
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.9753%	0.07255
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	71.2537%	0.11876
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	39.9033%	0.15400
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.5407%	0.08256
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.2900%	0.07017
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	84.2730%	0.10377
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.7259%	0.08923
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	8.99565%	0.21684
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	37.9764%	0.15652
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9379%	0.05854
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.7764%	0.07379
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.8892%	0.06080
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.0652%	0.07193

**Tabla 3.8-1** Aplicación de prueba de Kolmogorov – Smirnov en el mes de Febrero (elab. propia)

febrero - F1= 95.0000 %	Value
Normal	9.08613
Normal (L-Moments)	8.81283
LogNormal	32.2121
Galton	19.4530
Exponential	41.0102
Exponential (L-Moments)	35.2470
Gamma	25.5590
Pearson III	19.9154
Log Pearson III	28.9753
EV1-Max (Gumbel)	24.6243
EV2-Max	47.5477
EV1-Min (Gumbel)	-1.07983
EV3-Min (Weibull)	20.2042
GEV-Max	19.9401
GEV-Min	21.2889
Pareto	27.5292

**Tabla 3.8-2** Predicción del caudal al 95% de excedencia (elab. propia)

Finalmente, se crea la curva de variación estacional de caudales correspondiente al 95% de excedencia, la cual corresponde a la curva mensual de caudales ecológicos. Al compararla con la curva de variación estacional de la escorrentía (gráfico 3.8-1), se obtiene que en promedio representa el 21% de esta, valor ligeramente por encima de la media del rango habitual de caudales ecológicos (10-25%), pero perfectamente posible dada la diversidad de métodos propuestos para su cálculo y la gran variabilidad de sus resultados (Alcázar, 2007).



**Gráfico 3.8-1** Comparación de caudales ecológicos vs escorrentía (elab. propia)

### 3.8.2 BALANCE HÍDRICO MENSUAL EN EL EMBALSE

#### Demanda hídrica por uso agrícola



**Gráfico 3.8-2** Demanda unitaria estacional agrológica en mm/ha  
(elaborado a partir de Municipalidad de Vilcanchos, 2011)

En general, la demanda es una variable que se expresa con un ciclo anual que se repite durante todo el período simulado. Para uso agrícola, este volumen depende del comportamiento del tipo de cultivo durante el año, el área a regar y la eficiencia del sistema de riego. Dado que este apartado corresponde a la ingeniería agronómica, su desarrollo está fuera del alcance de esta tesis. Debido a esto, los coeficientes usados de la demanda agrícola, en mm/ha, se obtienen desde un documento adjunto del antiguo estudio del proyecto<sup>19</sup>. Este apartado considera

<sup>19</sup> Ver Ref. [47]

alternancia entre diversos cultivos (papa, choclo, alverja, etc.), y calcula sus propios  $ET_o$ ,  $K_c$  y Precipitación efectiva ( $P_e$ ) por métodos distintos a los aplicados en los capítulos anteriores.

Como resultado, se obtiene la demanda estacional de riego agrícola por hectárea cultivada (gráfico 3.8-2). Para cuantificar el total de demanda hídrica agrícola, se consideran de forma inicial 100 hectáreas cultivadas en el proyecto. Posteriormente, se analiza su sensibilidad respecto a su variación porcentual.

## Ecuaciones representativas de la geometría del embalse

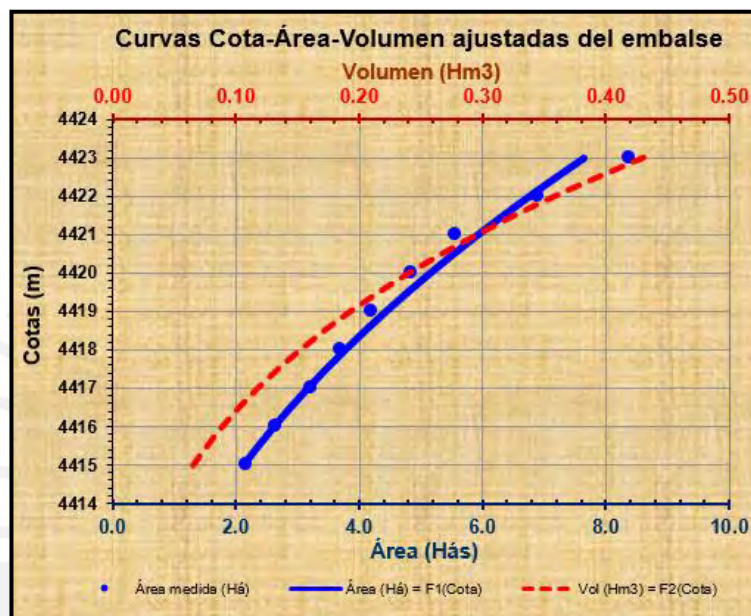


Figura 3.8-2 Ajuste de funciones probabilísticas de la geometría del embalse (elab. propia)

Las relaciones de las alturas en la presa con las áreas y capacidades del embalse deben ser representadas por funciones continuas. Aplicando las operaciones explicadas en el cap. 2.3.2, se obtiene una función de área con un ajuste  $-R^2$  del 99% respecto de los pares discretos (fig. 3.8-2), por lo que se acepta la función, y se procede a generar las cuatro ecuaciones representativas de la geometría del embalse, las cuales se muestran en la tabla 3.8-3.

Coeficientes de las curvas ajustadas				
F1	Area = $F_1(cota)$	por mínimos cuadrados de los logaritmos	a	0.018
	A [Há] = $a.(H-H^*)^b$		b	2.113
F2	Vol = $F_2(cota)$	por integración de $F_1$	c	0.0001
	Vol [Hm3] = $c.(H-H^*)^d$		d	3.113
F3	Cota = $F_3(Volumen)$	función inversa de $F_2$	e	23.025
	H[msnm] = $H^* + e.(Vol)^f$		f	0.321
F4	Área = $F_4(Volumen)$	como $F_1(F_3(Vol))$	g	13.521
	A [Há] = $g.(Vol)^h$		h	0.679
0.99	= $R^2$ , Coeficiente de correlación de F1			

Tabla 3.8-3 Parámetros de ecuaciones de la geometría del vaso (elab. propia)

## Simulación del balance hídrico

Una vez obtenidas todas las componentes descritas en el cap. 2.3.1, y asumiendo un volumen medio inicial del embalse, se ejecutan los *Algoritmos de operación del embalse*, descritos en el cap. 2.3.2, descartando nuevamente el primer año de simulación (tabla 3.8-4).

BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE ENTRE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA																	
															Presa Champacocha		
			Ht	Hv	Ar				ISD Índice de Satisfacción de la Demanda		83.18 %						
			4415.0	4421.8	100.0				VolHt	VolHv							
			0.06	0.35													
año	mes	Vosci	Prec.	Evap.	Dem.	Pi-Evi	Vdi	Vsi	Vemb	Aemb	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri	Aporte
	i	(Hm3)	(mm)	(mm)	(mm)	(Hm3)/Há	(Hm3)	(Hm3)	(Hm3)	(Ha)			(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Hm3)	(Hm3)
1983	2	0.09	150.25	99.82	55.78	0.0005	0.056	0.052	0.309	6.09	6.21	0.310	0.310	6.10	0.000	0.056	0.090
1983	3	0.08	123.91	102.57	78.51	0.0002	0.079	0.053	0.258	5.39	5.75	0.258	0.258	5.39	0.000	0.079	0.080
1983	4	0.06	106.87	88.78	99.06	0.0002	0.099	0.029	0.192	4.42	4.90	0.192	0.192	4.41	0.000	0.099	0.063
1983	5	0.04	24.47	89.56	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.116	3.14	3.78	0.113	0.113	3.09	0.000	0.098	0.033
1983	6	0.02	0.68	83.78	84.60	-0.0008	0.085	0.006	0.039	1.49	2.29	0.037	0.065	2.11	0.000	0.056	0.014
1983	7	0.01	0.16	90.99	59.49	-0.0009	0.059	0.003	0.010	0.59	1.35	0.009	0.065	2.11	0.000	0.003	0.006
1983	8	0.00	19.1	102.69	19.59	-0.0008	0.020	0.001	0.047	1.70	1.91	0.046	0.065	2.11	0.000	0.000	0.001
1983	9	0.01	96.35	109.53	25.65	-0.0001	0.026	0.000	0.051	1.79	1.95	0.050	0.065	2.11	0.000	0.011	0.011
1983	10	0.01	28.62	124.98	0.00	-0.0010	0.000	0.000	0.076	2.34	2.23	0.073	0.073	2.30	0.000	0.000	0.009
1983	11	0.00	22.43	126.50	0.00	-0.0010	0.000	0.000	0.078	2.39	2.34	0.075	0.075	2.34	0.000	0.000	0.002
1983	12	0.10	218.17	123.33	35.14	0.0009	0.035	0.004	0.133	3.44	2.89	0.135	0.135	3.47	0.000	0.035	0.099
1984	1	0.08	110.57	106.05	25.50	0.0000	0.025	0.020	0.174	4.12	3.80	0.173	0.173	4.11	0.000	0.025	0.083
1984	2	0.35	355.7	95.61	55.78	0.0026	0.056	0.052	0.416	7.45	5.78	0.423	0.346	6.58	0.078	0.056	0.359
1984	3	0.42	299.39	94.42	78.51	0.0020	0.079	0.053	0.633	9.91	8.24	0.637	0.346	6.58	0.291	0.079	0.423
1984	4	0.22	108.54	84.91	99.06	0.0002	0.099	0.029	0.440	7.75	7.16	0.436	0.346	6.58	0.090	0.099	0.219
1984	5	0.11	7.06	81.65	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.348	6.60	6.59	0.340	0.340	6.51	0.000	0.098	0.106
1984	6	0.05	11.54	71.74	84.60	-0.0006	0.085	0.006	0.300	5.97	6.24	0.295	0.295	5.90	0.000	0.085	0.045
1984	7	0.02	9.3	80.16	59.49	-0.0007	0.059	0.003	0.255	5.34	5.62	0.250	0.250	5.28	0.000	0.059	0.017
1984	8	0.01	21.92	89.65	19.59	-0.0007	0.020	0.001	0.239	5.12	5.20	0.235	0.235	5.07	0.000	0.020	0.006

Tabla 3.8-4 Extracto de planilla de la simulación del balance hídrico en el reservorio (elab. propia)

Con los resultados del balance hídrico, se compara el volumen total de riego agrícola demandado contra el suministrado (cap. 2.3.2), calculando un **Índice de Satisfacción de la Demanda -ISD- de 83.18%**. En el anexo IV se muestra el registro temporal de la variación de los niveles y volúmenes del embalse, así como la comparación simbólica en proporción de los déficits y superávits mediante una representación en barras. Con estos datos se elabora el gráfico 3.8-3, donde se observa de manera esquemática los resultados de la simulación.

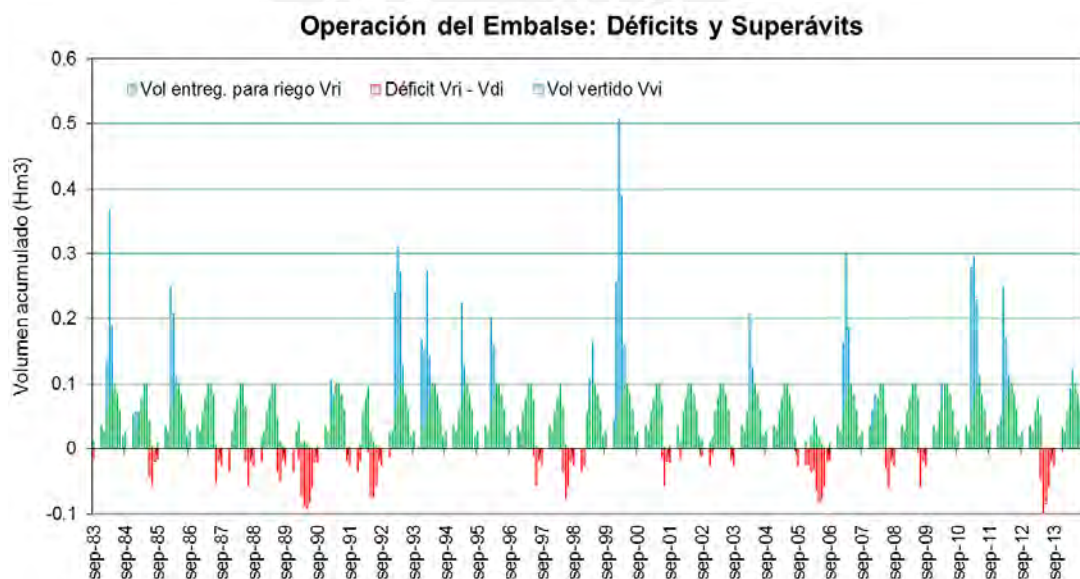


Gráfico 3.8-3 Resultados de la simulación a nivel mensual (elab. propia)

### 3.8.3 ANÁLISIS DE SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA

Para una mejor evaluación del proyecto con fines de toma de decisiones para la ingeniería final, se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros relevantes, variando la cota de vertido ( $H_v$ ) en la altura del borde libre (que es hasta donde llegan las curvas área-cota-volumen procesadas del embalse), es decir, en  $\pm 1.20$  m., y el área regada ( $A_r$ ), en un valor porcentual arbitrariamente adoptado de  $\pm 20\%$ . Para este fin, mediante una macro en Excel que automatiza los cálculos, se genera finalmente el gráfico 3.8-4.

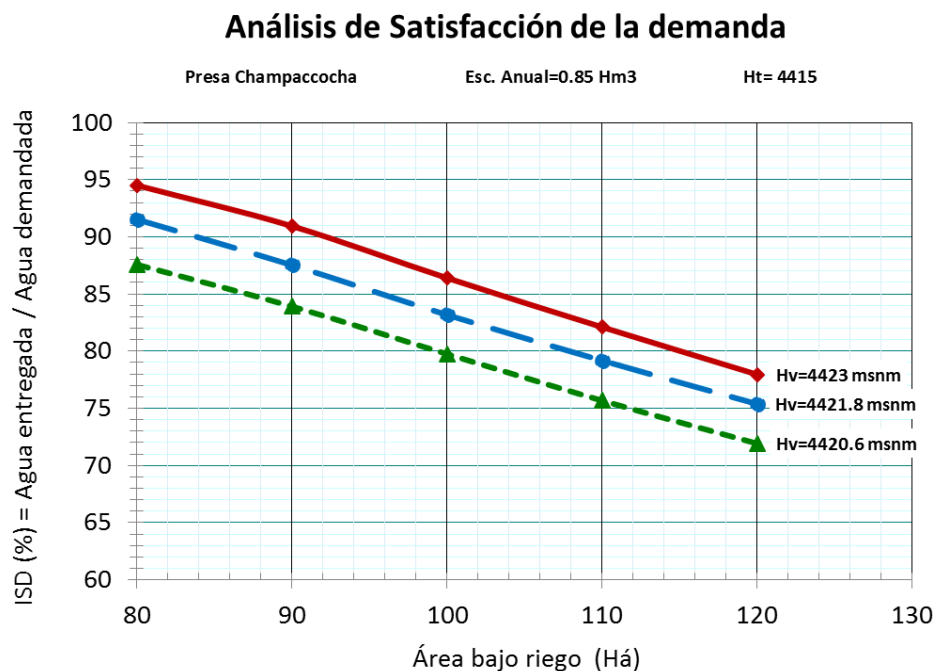


Gráfico 3.8-4 Sensibilidad del ISD de acuerdo a la variación de  $H_v$  y  $A_r$  (elab. propia)

### Dimensionamiento definitivo de la presa

Para la elección de la cota definitiva de inicio de vertido (que condiciona directamente la altura de la presa), se debe definir el margen de confiabilidad que se permite el proyecto según su nivel de importancia. En el Perú, a diferencia de otros países de la región, no existe una norma que determine el grado mínimo de ISD para abastecimiento hídrico (p. ej. en España, para usos agrícolas, se definen garantías mínimas de 85-90%), sin embargo, en la revista oficial de la ANA, se recomienda asegurar una confiabilidad del volumen atendido mayor al 90% (González-Otoya, 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, en caso se decidiera mantener la cota de vertido original (4421.8 msnm), para obtener un valor de garantía hídrica admisible (un ISD = 91.5%), solo se puede asegurar el abastecimiento de 80 Ha para el riego agrícola, representando un aumento del 31.5% con respecto a las condiciones naturales (ISD sin proyecto = 60%).

Sin embargo, se recuerda que el área total inicialmente proyectada para ser abastecida con propósitos de riego tecnificado era de 534 Ha (ver cap. 3.1). En este escenario se obtiene un ISD sin proyecto de 20% y con proyecto de 21.4%, valores muy lejanos de porcentajes de eficiencia óptimos, lo cual fuerza a reducir de forma considerable la magnitud de la demanda hídrica agrícola y así llegar a un ISD aceptable.

Todas estas consideraciones quedan expresadas en la tabla 3.8-5, en la cual se observa la variación del ISD en las condiciones con y sin proyecto, para el escenario de riego original y definitivo, y evaluando la influencia de los caudales ecológicos en el cálculo.

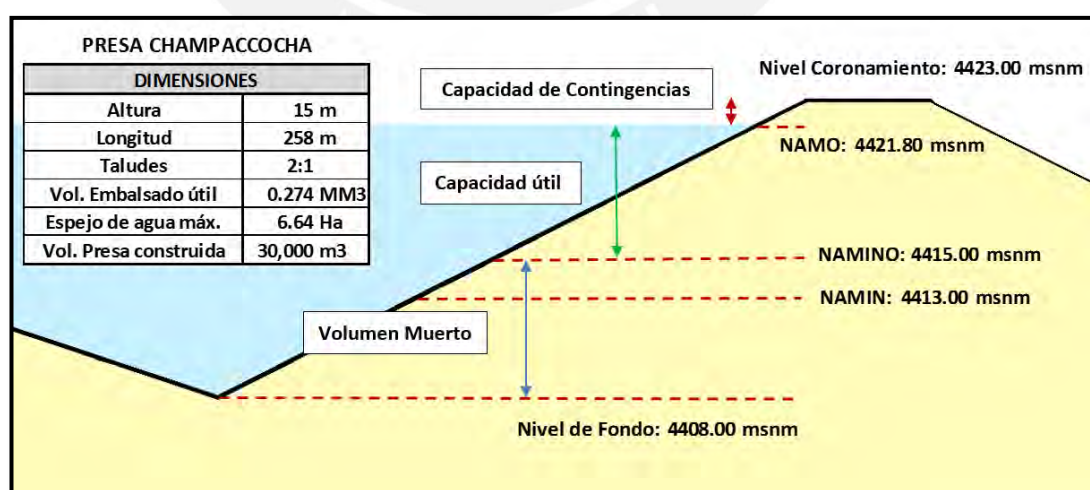
ISD (%)	Ar Original = 534 Ha		Ar Final = 80 Ha	
	S/ Proyecto	C/ Proyecto	S/ Proyecto	C/ Proyecto
S/ Qeco	25.4%	27.1%	69.7%	99.3%
C/ Qeco	20.0%	21.4%	60.0%	91.5%

\* Cota de vertido con proyecto en 4421.8 msnm

**Tabla 3.8-5** ISD bajo diferentes configuraciones (elab. propia)

Como se aprecia, la influencia del caudal ecológico provoca variaciones mínimas, del orden de 5-10%, lo que evidencia que casi no tiene dependencia del tipo de escenario analizado, por otro lado, se observa que, mientras el escenario final presenta aumentos significativos del orden de 30% en condiciones con proyecto, el escenario original prácticamente no se ve influenciado por la infraestructura.

Debido a este minucioso análisis, se decide mantener las dimensiones calculadas para la altura máxima de una pequeña presa, por lo que para 15 m. de altura, las dimensiones y niveles finales de la represa Champacocha son las dispuestas en la fig. 3.8-3.



**Figura 3.8-3** Dimensiones y niveles finales de la represa Champacocha (elab. propia)

### 3.9 VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Aunque no es usual que se le incluya en un diseño habitual de disponibilidad hídrica, a fin de obtener una visión global de la vigencia en el tiempo de los cálculos realizados, se estima conveniente introducir un análisis general de cambio climático en el área de estudio.

En el año 2010, como parte de los documentos preparados para el *Proyecto Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)*, el SENAMHI publica un informe sobre la variabilidad meteorológica en el territorio nacional en los últimos 40 años, y realiza proyecciones de precipitaciones y temperaturas con miras hacia décadas futuras.

#### Tendencias hasta la actualidad

Con base en el análisis de las precipitaciones ocurridas en el período 1965 – 2006, se concluye que la región de la sierra central es la que a través de los años se convierte en la menos propicia para la ocurrencia de inundaciones por la progresiva disminución de sus lluvias extremas, así como de la intensidad de las mismas (SENAMHI, 2010). En el caso de las temperaturas, estas se han mantenido relativamente constantes en la sierra central.

#### Escenario climático 2030

Las lluvias extremas estimadas mostrarían un probable decrecimiento en los próximos 30 años en gran parte del territorio. Por otro lado, los períodos secos (*CDD*) están incrementándose en mayor grado que los períodos húmedos (*CWD*) a nivel nacional. La tendencia del *CDD* muestra incrementos en la sierra central occidental entre 2 a 3 días/año.

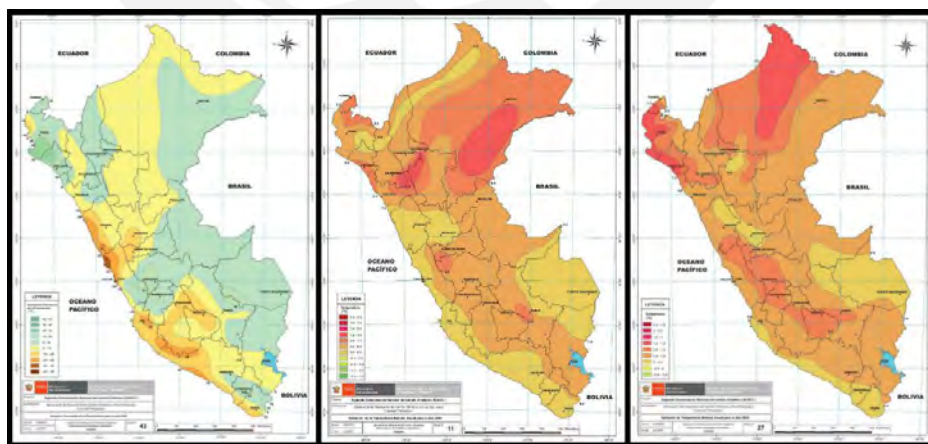


Figura 3.9-1 Mapas de proyecciones al 2030 de las variaciones de Pp, T<sub>máx</sub> y T<sub>min</sub> (SENAMHI, 2010)

El SENAMHI ha creado mapas nacionales de las variaciones porcentuales de las tres variables meteorológicas principales para el escenario de emisión A2 (altas emisiones) con proyecciones al año 2030 (fig. 3.9-1), determinando para la zona de estudio incrementos de T<sub>máx</sub> y T<sub>min</sub> de

+0.6% y 0.7%, respectivamente, y una disminución del 9% para  $P_p$ , valores que comparados con los estimados en otras zonas del país (con alteraciones en algunos casos de hasta 30%) no son significativos en términos de cambio climático.

## 4 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

### Conclusiones

- Los valores de precipitación media anual (1033 mm) y temperatura media anual (5.15 C°), se encuentran dentro de los rangos característicos de  $P_{med}$  (1,088.5 – 513.4 mm) y  $T_{med}$  (6.9 – 4.6 C°) de la zona de vida “Páramo muy húmedo Subalpino Subtropical”. Asimismo, los rangos de temperatura calculados y los valores regionales de la ANA son muy cercanos. Estas dos situaciones validan la metodología utilizada en el procesamiento hidrológico.
- Los gráficos de variables meteorológicas vs altitud (fig. 3.3-12) corroboran las buenas elecciones de estaciones escogidas para caracterizar la climatología de la cuenca de estudio, tomando como base los mapas nacionales de rangos climáticos de SENAMHI. En el caso de las precipitaciones, evidentemente siendo solo dos estaciones el coeficiente de correlación es 1, sin embargo, si se regresiona con todas las estaciones el r (coeficiente de Pearson) está alrededor de 0.5 (valor inaceptable), demostrando la buena selección actual de estaciones. Asimismo, en el caso de las temperaturas, se presentan coeficientes de correlación muy altos en todos los escenarios (mayores a 0.93), lo cual demuestra la correcta decisión de utilizar todas las estaciones disponibles.
- Los resultados observados en la gráfica de volúmenes escurridos en las épocas húmeda y seca del año (gráfico 3.4-3), determinan que se concentra casi el 80% del escurrimiento total en solo cuatro meses, lo que manifiesta la gran variabilidad de los caudales generados en la cuenca Champacocha, y evidencia su gran necesidad de regulación para uniformizar la oferta hídrica mensual.
- El volumen teórico ocupado por los sedimentos retenidos en el embalse representa poco más del 0.37% de su capacidad útil total. Si bien existe bastante variabilidad en los métodos para cálculo de la erosión, por lo cual esta cantidad podría ser hasta el doble, aun así seguiría siendo una tasa relativamente baja. Esta ínfima cantidad se explica principalmente por su cubierta vegetal, la cual propicia un adecuado control de la erosión.
- Las filtraciones que traspasan la presa por año significan el 0.01% del volumen de escurrimiento anual de la cuenca, valor casi nulo que demuestra la alta efectividad del sistema empleado mediante zanja de impermeabilización total en los cimientos.
- La simulación de la operación de presa con la demanda hídrica original (534 Ha.) implica un aumento tan solo de 1.5% en el ISD con el proyecto ejecutado, respecto a las condiciones naturales actuales, lo que evidencia que la presa prácticamente no genera influencia alguna

ante una solicitación de demanda de riego agrícola tan alta. Este escenario sería estadísticamente imposible de satisfacer con las condiciones actuales proyectadas, por lo que una garantía hídrica proporcionada para 80 Ha. se considera adecuada.

- Esto último refleja la gran restricción hídrica de proyectar la presa en una cuenca tan pequeña (menos de 3 Km<sup>2</sup>), y de la forma tan poco favorable del vaso desarrollado por el represamiento (muy empinado, se gana muy poco volumen por metro de curva de nivel).
- Por restricciones en la información recibida, ya se tenía fija la cerrada de la presa, sin embargo, en las inmediaciones del proyecto se pueden identificar mejores emplazamientos potenciales para superar la oferta hídrica alcanzada con la presa Champacocha. Por otro lado, otra opción es recrecer la presa Champacocha a alturas mucho mayores (por lo menos el doble), aunque el proyecto ya pasaría al dominio de las grandes presas, y su viabilidad se complicaría dada la naturaleza social de este tipo de iniciativas agrícolas.
- Se estima que las variaciones de temperatura y de precipitación no son significativas en comparación con los cambios proyectados en otras zonas del país, siendo Ayacucho uno de los departamentos más estables y que menos se verán influidos por los efectos del cambio climático. Por lo tanto, según las proyecciones descritas, se concluye que el presente estudio tiene validez técnica hasta el año 2030.

## **Comentarios finales**

### **Sobre las fuentes de información WEB-GIS**

- La caracterización de cuencas de estudio aplicando en conjunto las múltiples variables consultadas puede llegar a ser un procedimiento sencillo y rápido cuando se usa con criterio y dentro de los límites establecidos en las guías correspondientes.
- Estas fuentes extras ofrecen sin duda grandes referencias de las condiciones in situ, facilitando y complementando el planeamiento de las visitas de campo, especialmente para realizar estudios a nivel de perfil, ya que estos no necesitan información muy precisa, y, por el contrario, buscan respuestas a groso modo para validar proyectos viables.

### **Sobre los softwares de ingeniería hidrológica – hidráulica**

- Se evidencia la alta capacidad de geoprocésamiento del terreno digital que producen las herramientas hidrológicas de software GIS, ya sea por ArcHydroTools en ArcGIS, o GRASS en QGIS. La determinación de direcciones de flujo, áreas acumuladas y otros parámetros morfológicos para cuencas y cauces, son de gran ayuda para la simplificación del trabajo y posterior interpretación del ingeniero.
- SEEP/W de Geostudio es un software muy potente para el cálculo y post-visualización de filtraciones a través de presas. El nivel de personalización que presenta permite construir

modelos complejos con diversos materiales y geometrías, simulando desde estratos rocosos y suelos, hasta materiales recientes como geosintéticos.

- El algoritmo CORMUL del programa CHAC ha demostrado una potencia enorme de predicción de datos faltantes, el cual mediante sus matrices de priorización y parámetros de ajuste completa de manera muy razonable los períodos sin información.
- El gran kit de herramientas que compila Hydrognomon implica un gran alivio en la carga de trabajo para análisis hidrológico de series de tiempo para las distintas variables meteorológicas, lo cual reduce en gran medida el tiempo en esta parte de la ingeniería.

### **Sobre el modelo precipitación – escorrentía de Témez**

- Si bien en la actualidad los modelos distribuidos, que calculan de forma mallada los resultados (como el modelo Tetis de la UPV), son parte de la siguiente generación en modelamiento hidrológico continuo, ha quedado evidenciada la gran versatilidad del modelo de Témez en su aplicación para pequeñas cuencas, el cual calcula con relativa simpleza y facilidad la escorrentía superficial mensual, lo que lo hace muy útil en el medio aplicativo de cabeceras de cuenca altoandinas.
- Se considera lo realizado como un primer paso para la validación del modelo de Témez. Lo desarrollado debe ser complementado, como cualquier modelo de balance hídrico, con calibración con aforos de caudales. Esto puede ser realizado mediante el módulo especializado de CHAC para calibración del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) y los parámetros del modelo Témez, que incluso permite modelar al acuífero con dos ramas de descarga.
- Sin duda, justamente los valores de referencia con los cuales determinar los parámetros del modelo ( $H_{m\acute{a}x}$ ,  $C$ ,  $I_{max}$  y  $\alpha$ ) son escasos, circunstancia que resta precisión al modelo, sin embargo, se espera que de adoptarse el modelo de Témez en el territorio nacional como método oficial para el cálculo de la disponibilidad hídrica en pequeñas presas, se concentren esfuerzos de calibrado para poder generar una gran base de datos en el país con la cual potenciar la aplicación y alcance de este modelo, llegando así a resultados muy satisfactorios, tal y como ya sucede en países vecinos como Uruguay o España.
- Asimismo, concluir que para el diseño de pequeñas presas es más que suficiente este sencillo modelo, y si se decide adoptarlo como directriz, la publicación de mapas de sus parámetros descriptores agilizaría los cálculos de disponibilidad hídrica en gran medida.

Finalmente, resaltar que si bien es posible que con posteriores estudios técnico – económicos se determine que, según las eficiencias de abastecimiento mostradas, la represa no es rentable, esta conclusión es solo un resultado específico de este proyecto en particular, siendo la principal intención y legado de esta tesis la exposición y sistematización del uso en conjunto de los modelos y herramientas informáticas empleadas para el cálculo de la disponibilidad

hídrica en pequeñas presas, por lo cual son perfectamente aplicables en cientos de casos de la mismo índole, donde muchos de ellos probablemente resultarán con evaluaciones positivas que le den la viabilidad deseada.

Por lo tanto, se espera que esta tesis sea un documento de consulta útil para futuros expedientes técnicos de disponibilidad hídrica de pequeñas presas en zonas altoandinas, con lo cual puedan llevarse a cabo correctos estudios de ingeniería de forma más práctica y productiva, que luego se traduzcan en versiones corregidas y mejoradas que potencien los cientos de proyectos hidráulicos que necesita nuestro país.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

1. Aguirre, M. (1992). *Análisis y aplicación de modelos matemáticos para la generación de caudales mensuales en cuencas de la región*. Cusco: UNSAAC.
2. Alcázar, J. (2007). *El Método del Caudal Básico para la determinación de Caudales de Mantenimiento. Aplicación a la Cuenca del Ebro*. Lleida: Universidad de Lleida.
3. Álvarez, J. (2011). *Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos*. Universidad Politécnica de Madrid.
4. Álvarez, J. (2013). *Completado de datos meteorológicos: Modelo CORMUL*. Madrid: CEDEX .
5. Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2010). *Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del Río Pampas*. Lima: MINAGRI.
6. Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2012). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú, aplicando la metodología Pfafstetter. Memoria Descriptiva*. Lima: MINAGRI.
7. Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). *Inventario de presas en el Perú - Primera parte*. Lima: MINAGRI.
8. Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). Metodología para determinar caudales ecológicos. *Resolución Jefatural No. 98-2016-ANA* (págs. 3-4). Lima: Diario Oficial El Peruano.
9. Barberà, C. (2007). *Plan director de abastecimiento y saneamiento de las cuencas internas del departamento de la Libertad - El Salvador*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
10. Barreda, A., & Llasat, M.-d. C. (2004). *Evolución regional de la precipitación en España en los últimos 100 años*. Madrid: CEDEX.
11. Bodoque, J., & et al. (2001). Evaluación de la degradación específica en la cuenca vertiente al embalse de Puente Alta (Segovia), mediante métodos de estimación directos e indirectos. *C&G*, 3-4(15), 21-36.
12. Bureau of Reclamation. (2007). *Diseño de pequeñas presas 3ra ed. Español*. Madrid: Bellisco Ediciones.

13. Campos Cedeno, A. (2016). *Hidráulica e Hidrología para Ingeniería*. Moscú: Universidad de la Amistad de los Pueblos de Rusia.
14. Cantos Figuerola, J. (1978). *Tratado de Geofísica Aplicada 2da ed*. Madrid: Litoprint.
15. CAZALAC. (2015). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de américa latina y el caribe*. Chile: UNESCO.
16. CEDEX. (2010). *Técnicas Geofísicas*. Madrid.
17. CEDEX. (2013). *Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas: Manual CHAC*. Madrid.
18. Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima: PUCP.
19. Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
20. Convenio de cooperación técnica IILA & SENAMHI & UNI. (1982-1983). *Estudio de la Hidrología del Perú*. Lima: Publicación del Instituto Italo-Latino Americano - SENAMHI.
21. DINAGUA. (2011). *Manual de diseño y construcción de pequeñas presas 2da ed. Volumen I: Diseño hidrológico - hidráulico*. Montevideo: MVOTMA.
22. Drake, K., & Hogan, M. (2013). *Watershed management guidebook*. USA: Integrated Environmental Restoration Services, Inc.
23. ESRI. (2011). *Arc Hydro Geoprocessing Tools Version 2.0 - Tutorial*. New York.
24. Estrada, L. (2008). *Prospección sísmica*. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán.
25. FAO Riego y Drenaje. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
26. Fattorelli, S., & Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico 2da ed*. Zaragoza: Water Assessment & Advisory Global Network.
27. GEO-SLOPE International Ltd. (2012). *Seepage Modeling with SEEP/W: An Engineering Methodology*. Obtenido de <https://www.geo-slope.com/products/seep-w> 2012
28. González-Otoya, V. (2016). Los balances hídricos y los indicadores de atención de las demandas. *Agua y más - Revista de la Autoridad Nacional del Agua*. Edición No. 05, 42-47.
29. Gracia, J. (1997). *Manual de Ingeniería de Ríos*. México: UNAM-CONAGUA.
30. IBM Corporation. (2012). *Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 21*. USA.
31. INRENA. (1995). *Mapa Ecológico del Perú – guía explicativa 2da ed*. Lima: MINAGRI.
32. ITIA. (2010). *Documentación teórica para el software Hydrognomon versión 4*. Grecia: Universidad Técnica Nacional de Atenas.

33. IUSS Working Group WRB. (2007). *Base referencial mundial del recurso suelo. Primera Actualización 2007. Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 103*. Roma: FAO.
34. IUSS Working Group WRB. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015. Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 106*. Roma: FAO.
35. Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics - 5th ed.* New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.
36. Kozani, S., & Markonis, I. (2009). *Hydrognomon versión 4. Manual de usuario*. ITIA. Grecia: Universidad Técnica Nacional de Atenas.
37. Land & Water Division CBL. (2007). *Digital soil map of the world v.3.6. - Generalized soil unit information on soil characteristics*. Roma: FAO.
38. López, G. (2011). *Introducción a la modelización de redes de flujo mediante el uso del programa SEEP/W 2007*. España: Universidad de Córdoba.
39. Martínez, R., & Otros. (2011). SEDA: Servidor de datos para el estudio de la alteración hidrológica. *Revista Ingeniería Civil* (164), pág. 78-90.
40. McEnroe, B. (2010). *Guidelines for Continuous Simulation of Streamflow in Johnson County, Kansas, with HEC-HMS*. USA: Universidad de Kansas.
41. Mendoza, F. (2014). *Modelación del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente, aplicación al río Las Cruces*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
42. MINAM. (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal – Memoria descriptiva*. Lima.
43. Molfino, J., & Califra, A. (2001). *Agua disponible de las tierras del Uruguay*. Montevideo: DINAGUA.
44. Molina, J., & Espinoza, D. (2005). *Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo*. La Paz - Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
45. Morche, W., La Torre, O., De la Cruz, N., & Cerrón, F. (1996). Geología del cuadrángulo de Huachocolpa. *Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 63*. Lima: INGEMMET.
46. Morgan, R. P. (2005). *Soil Erosion and Conservation, 3rd edition*. Oxford: Blackwell Publishing.
47. Municipalidad distrital de Vilcanchos. (2011). *Perfil Técnico: “Instalación del servicio de agua del sistema de riego Vilcanchos, Espite, San Jacinto y San Miguel”*. Ayacucho.
48. Novak, P., Moffat, A., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras hidráulicas 2da ed.* University of Newcastle, U.K.: Chapman & Hall.
49. Ocampo, L. (2012). *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
50. Olaya, V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno*. Madrid.

51. Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid.
52. Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). *Guía de prácticas climatológicas* (Vols. OMM-Nº 100). Suiza.
53. Palacios, O. (1994). Geología del cuadrángulo de Santiago de Chocorvos y Paras. *Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 49*. Lima: INGEMMET.
54. Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2014). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos: Manual Técnico v1.1*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
55. PHI-LAC. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas Vol. I*. Montevideo: UNESCO.
56. Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente 3ra ed*. Madrid, España: Ediciones MundiPrensa.
57. Portuguez, D. (2015). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del Río Siguanay utilizando Geoinformática. *Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Revista Anales Científicos, 76 (2), 324-329*.
58. Romero, W. (2016). *Estudio geofísico de refracción sísmica de la presa champaccocha*. Ayacucho: SM&W Investigaciones Geológico Geotécnico SRL.
59. Sánchez, E. (2014). *Análisis de métodos para la limpieza hidráulica de sedimentos desde embalses*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
60. Sánchez, F. J. (2013). *Hidrología e Hidrogeología*. Universidad de Salamanca. Obtenido de <http://hidrologia.usal.es>
61. SENAMHI. (2010). *Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030. Resumen técnico. Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Lima: MINAM.
62. SPANCOLD. (1994). *Selección de presas españolas, 1973-1993*. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
63. Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
64. USDA. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Tucson: Agriculture Handbook No. 703.
65. Van Dijk, A., Bruijnzeel, L., & Rosewell, C. (2002). Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology, vol. 261, 1-23*.
66. Vargas, L. (1970). Geología del cuadrángulo de Arequipa. *Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 24*. Lima: INGEMMET.
67. Vortex FdC SL & Barlovento Renovables Latinoamérica SAC. (2016). *Atlas eólico del Perú. Estudio para aprovechamiento eólico con fines energéticos y actualización del atlas eólico del Perú*. Lima: MINEM.
68. ZONISIG. (2001). *Procedimientos metodológicos de la zonificación agroecológica y socioeconómica*. La Paz: MDP.

# **ANEXOS**

- I. Apéndices auxiliares**
- II. Gráficos**
- III. Mapas nacionales**
- IV. Memorias de cálculo**

# **ANEXO I:**

## **APÉNDICES AUXILIARES**

- **Cálculo de curva I – D – F del proyecto:  
Método IILA – SENAMHI – UNI**
- **Prueba de datos atípicos (outliers)**
- **Uso de data satelital**

## Cálculo de curva I-D-F: Método IILA - SENAMHI - UNI

Este método alternativo para realizar la curva I-D-F ha sido definido por el estudio “Hidrología del Perú”, mediante el convenio la cooperación técnica I.I.L.A – SENAMHI – UNI en 1983.

$$I_{m\acute{a}x}(t, T_R) = a(t + b)^{n-1}(1 + K \cdot \text{Log} T_R)$$

, donde:

a	=	Parámetro de intensidad (mm)
b	=	Parámetro de tiempo (hora)
n	=	Parámetro de duración (adimensional)
K (K'g)	=	Parámetro de frecuencia (adimensional)
t	=	Tiempo o duración (hora) < 180 min = D
T <sub>R</sub>	=	Período de retorno (años)
Log	=	Logaritmo en base 10

### ➤ Parámetro de intensidad

El proyecto se encuentra en subzona 123<sub>10</sub> (fig. A1-1), con Altitud media (Y) = 4532 msnm.

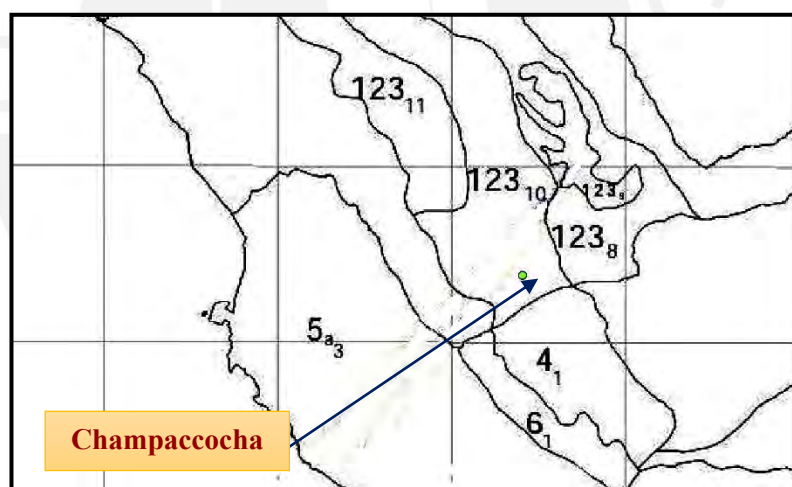


Fig. A1-1 Ubicación del proyecto en plano n.2-c del estudio IILA-SENAMHI-UNI (elab. propia)

De la *Tabla A1-1*, se obtiene el parámetro de intensidad en (mm):

$$a = 3.01 + 0.0025 \cdot (4532) = 14.34$$

### ➤ Parámetro de tiempo

b = 0.50 horas	.....	Costa, centro y sur
b = 0.40 horas	.....	Sierra
b = 0.20 horas	.....	Costa norte y Selva

Entonces para la región de Vilcanchos será:

**b = 0.40 horas**

➤ **Parámetro de duración**

De la *Tabla A1-1*, se obtiene el parámetro de duración

**n = 0.254**

➤ **Parámetro de frecuencia**

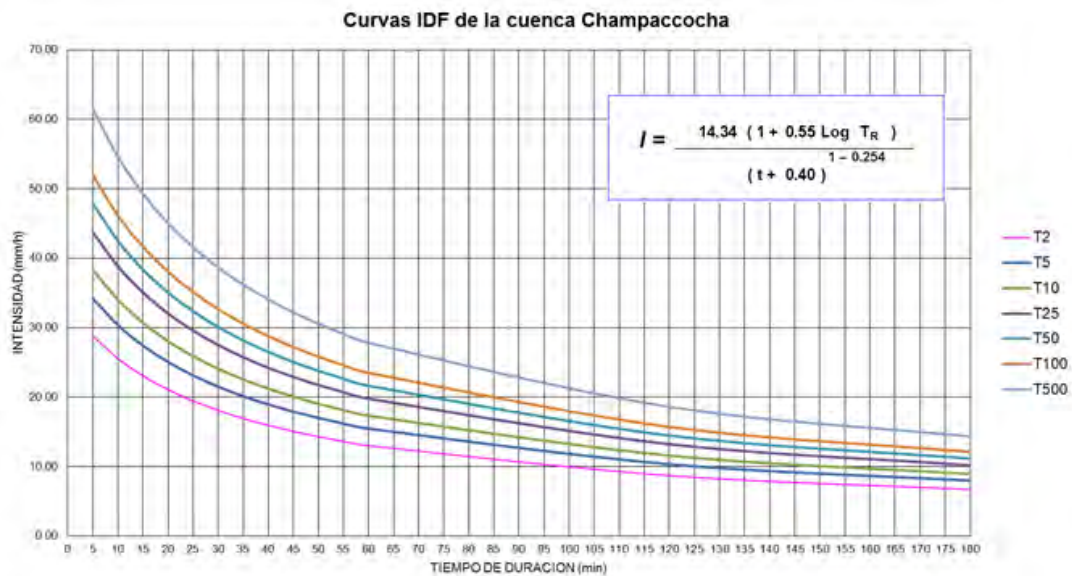
De la *Tabla A1-2*, se obtiene el parámetro de frecuencia

**K = 0.553**

Luego se procede conformar la curva IDF con los parámetros hallados y se reemplazan las variables para el caso de interés.

Tabla de intensidades - Tiempo de duración														
T <sub>R</sub> años	Duración en minutos													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	120	180
2	28.77	25.55	23.07	21.08	19.46	18.09	16.94	15.94	15.07	14.30	13.62	13.01	8.71	6.71
5	34.20	30.37	27.42	25.06	23.13	21.51	20.13	18.95	17.91	17.00	16.19	15.47	10.35	7.98
10	38.31	34.02	30.71	28.07	25.90	24.09	22.55	21.22	20.07	19.04	18.14	17.33	11.59	8.94
25	43.73	38.84	35.06	32.04	29.57	27.50	25.75	24.23	22.91	21.74	20.71	19.78	13.23	10.20
50	47.84	42.49	38.35	35.05	32.35	30.09	28.16	26.51	25.06	23.78	22.65	21.64	14.47	11.16
100	51.95	46.13	41.65	38.06	35.13	32.67	30.58	28.78	27.21	25.83	24.60	23.50	15.72	12.12
500	61.48	54.60	49.29	45.05	41.57	38.67	36.19	34.06	32.20	30.57	29.11	27.81	18.60	14.35

*Cuadro. A1-1 Intensidades para distintas duraciones y tiempos de retorno (elab. propia)*



*Fig. A1-2 Curvas IILA-SENAMHI-UNI de la cuenca Champaccocha (elab. propia)*

✓ **Para: t = 0.50 horas (30 min) y T<sub>R</sub> = 2 años:**

$$I_{m\acute{a}x(0.5,2)} = 14.34(0.50 + 0.40)^{(0.254-1)}(1 + 0.553 \cdot \text{Log}2)$$

$$I_{m\acute{a}x(0.5,2)} = 18.1 \text{ mm/h}$$

## TABLA A1-1

Valores de los parámetros **a** y **n** que junto con **K**, definen las curvas de probabilidad pluviométrica en cada punto de las subzonas.

SUB ZONA	ESTACIÓN	N° TOTAL DE ESTACIONES	VALOR DE n	VALOR DE a
123 <sub>1</sub>	321-385	2	0.357	32.2
123 <sub>3</sub>	384-787-805	3	0.405	$a = 37.85 - 0.0083 Y$
123 <sub>13</sub>	244-193	2	0.432	
123 <sub>5</sub>	850-903	2	0.353	9.2
123 <sub>6</sub>	840-913-918-958	4	0.380	11.0
123 <sub>8</sub>	654-674-679-709-713 714-732-745-752	9	0.232	14.0
123 <sub>9</sub>	769	1	0.242	12.1
123 <sub>10</sub>	446-557-594-653-672 696-708-711-712-715 717-724-757-773	14	0.254	$a = 3.01 + 0.0025 Y$
123 <sub>11</sub>	508-667-719-750-771	5	0.286	$a = 0.46 + 0.0023 Y$
5a <sub>2</sub>	935-968	2	0.301	$a = 14.1 - 0.078 D_c$
5a <sub>5</sub>	559	1	0.303	$a = -2.6 + 0.0031 Y$
5a <sub>10</sub>	248	1	0.434	$a = 5.8 + 0.0009 Y$

FUENTE: NORMAS LEGALES - ANEXO N°01 - HIDROLOGIA

Y= Altitud -msnm-, D<sub>c</sub>= Distancia a la cordillera -Km-, y D<sub>m</sub>= Distancia al mar -Km-

**TABLA A1-2**

Subdivisión del territorio en zonas y subzonas pluviométricas y valores de los parámetros  $K'_g$  y  $\epsilon_g$  que definen la distribución de probabilidades de hg en cada punto.

ZONA	$K'_g$	SUBZONA	$\epsilon_g$
123	$K'_g = 0.553$	123 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 85.0$
		123 <sub>2</sub>	$\epsilon_g = 75.0$
		123 <sub>3</sub>	$\epsilon_g = 100 - 0.022 Y$
		123 <sub>4</sub>	$\epsilon_g = 70 - 0.019 Y$
		123 <sub>5</sub>	$\epsilon_g = 24.0$
		123 <sub>6</sub>	$\epsilon_g = 30.5$
		123 <sub>7</sub>	$\epsilon_g = -2 + 0.006 Y$
		123 <sub>8</sub>	$\epsilon_g = 26.6$
		123 <sub>9</sub>	$\epsilon_g = 23.3$
		123 <sub>10</sub>	$\epsilon_g = 6 + 0.005 Y$
		123 <sub>11</sub>	$\epsilon_g = 1 + 0.005 Y$
		123 <sub>12</sub>	$\epsilon_g = 75.0$
		123 <sub>13</sub>	$\epsilon_g = 70.0$
4	$K'_g = 0.861$	4 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 20.0$
5a	$K'_g = 11. \epsilon_g^{-0.85}$	5a <sub>1</sub>	$\epsilon_g = -7.6 + 0.006 Y \quad (Y > 2300)$
		5a <sub>2</sub>	$\epsilon_g = 32 - 0.177 Dc$
		5a <sub>3</sub>	$\epsilon_g = -13 + 0.010 Y \quad (Y > 2300)$
		5a <sub>4</sub>	$\epsilon_g = 3.8 + 0.0053 Y \quad (Y > 1500)$
		5a <sub>5</sub>	$\epsilon_g = -6 + 0.007 Y \quad (Y > 2300)$
		5a <sub>6</sub>	$\epsilon_g = 1.4 + 0.0067 Y$
		5a <sub>7</sub>	$\epsilon_g = -2 + 0.007 Y \quad (Y > 2000)$
		5a <sub>8</sub>	$\epsilon_g = 24 + 0.0025 Y$
		5a <sub>9</sub>	$\epsilon_g = 9.4 + 0.0067 Y$
		5a <sub>10</sub>	$\epsilon_g = 18.8 + 0.0028 Y$
		5a <sub>11</sub>	$\epsilon_g = 32.4 + 0.004 Y$
		5a <sub>12</sub>	$\epsilon_g = 19.0 + 0.005 Y$
		5a <sub>13</sub>	$\epsilon_g = 23.0 + 0.0143 Y$
		5a <sub>14</sub>	$\epsilon_g = 4.0 + 0.010 Y$
5b	$K'_g = 130. \epsilon_g^{-1.4}$	5b <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 4.0 + 0.010 Y \quad (Y > 1000)$
		5b <sub>2</sub>	$\epsilon_g = 41.0$
		5b <sub>3</sub>	$\epsilon_g = 23.0 + 0.143 Y$
		5b <sub>4</sub>	$\epsilon_g = 32.4 + 0.004 Y$
		5b <sub>5</sub>	$\epsilon_g = 9.4 + 0.0067 Y$
6	$K'_g = 5.4 \epsilon_g^{-0.6}$	6 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 30 - 0.50 Dc$
9	$K'_g = 22.5 \epsilon_g^{-0.85}$	9 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 61.5$
		9 <sub>2</sub>	$\epsilon_g = -4.5 + 0.323 D_m, \quad (30 \leq D_m \leq 110)$
		9 <sub>3</sub>	$\epsilon_g = 31 + 0.475(D_m - 110), \quad (D_m < 110)$
10	$K'_g = 1.45$	10 <sub>1</sub>	$\epsilon_g = 12.5 + 0.95 D_m$

FUENTE: NORMAS LEGALES - ANEXO N°01 - HIDROLOGIA

## **Prueba de datos atípicos (outliers)**

El USWRC (1982) define *outlier* como “valor extremo o dato puntual que se separa de la tendencia general de la muestra”. Antes de realizar cualquier tratamiento estadístico a la información, se procede a realizar un análisis de datos dudosos, para determinar aquellos datos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La inclusión de estos datos sin un análisis previo puede conllevar a una curva de frecuencias distorsionada con relación a la que la muestra podría indicar.

Este análisis de extremos se realiza mediante la aplicación de umbrales que marcan un límite máximo desde el cual valores superiores se consideran *outliers*. Estos umbrales se determinan considerando la muestra con distribución normal y definiendo un nivel de confiabilidad.

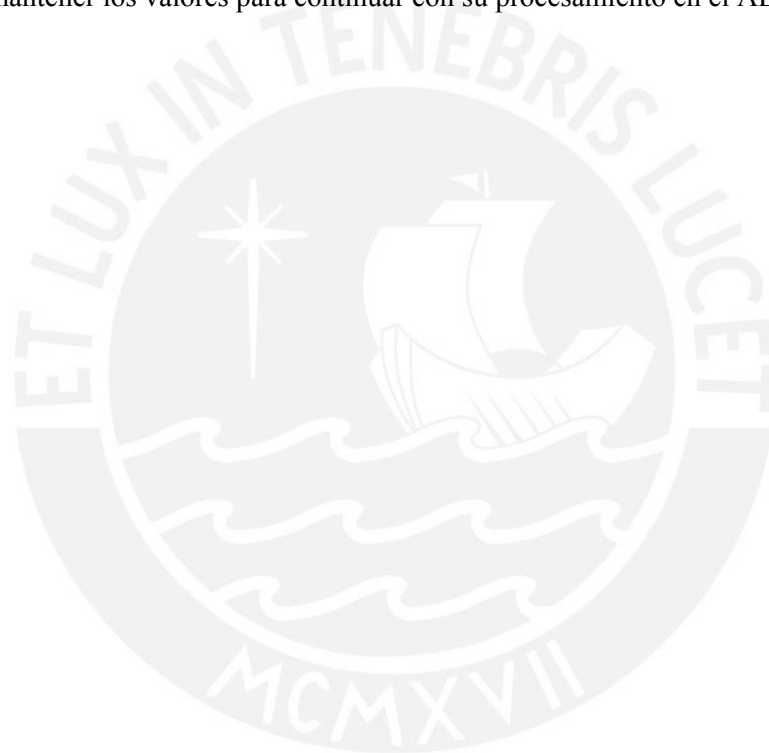
	Huancapi	Flags	Huancapi_3EFM	Flags	La Quinua	Flags	La Quinua_EFM	Flags	Paras	Flags	Paras_EFM	Flags
1967/01	185.40				56.50							
1967/02	286.30	SUSPECT			326.50	SUSPECT						
1967/03	192.90				445.60	SUSPECT						
1967/04	43.20				46.00							
1967/05	3.10				48.80							
1967/06	0.00				0.00							
1967/07	24.90				31.70							
1967/08	19.60				15.90							
1967/09	25.90				61.60							
1967/10	57.60				112.60							
1967/11	19.40				114.70							
1967/12	23.70				189.20							
1967			664.60				828.60	SUSPECT				
1968/01	83.40				216.70	SUSPECT			40.10			
1968/02	91.20				193.20				424.90	SUSPECT		
1968/03	132.10				127.70				254.50	SUSPECT		
1968/04	22.20				62.80				25.20			
1968/05	20.30				14.10				1.00			
1968/06	6.00				42.10				3.60			
1968/07	11.10				12.60				0.20			
1968/08	34.40				5.10				8.60			
1968/09	9.00				32.30				98.70			
1968/10	34.20				95.40				34.90			
1968/11	52.10				118.50				94.60			
1968/12	43.80				146.80				136.40			
1968			306.70				537.60				719.50	

**Fig. A2-1** Vista de lista donde se aprecia la eliminación de la gran mayoría de etiquetas de valores sospechosos cuando se trabaja por etapa lluviosa del año (elab. propia)

Se considera para la evaluación de la muestra marcar como extremos los valores que superen al denominado *valor máximo probable* ( $\mu + 2\sigma$ ), correspondiente aproximadamente al 95% de confiabilidad. Mediante la opción *Range Check* se realiza el procedimiento, por el cual al lado derecho de las celdas que superan el umbral aparece la etiqueta “sospechoso” -*suspect*-. Primero se realiza la corrida con todos los meses del año, con la cual se aprecia que los pocos valores marcados como *outliers* se concentran entre los meses de Enero a Marzo (tan solo un par muestra desfase temporal, apareciendo en Diciembre o Abril), es decir, la época húmeda, lo cual puede indicar que dado que las lluvias de esta parte del año hidrológico concentran la mayor proporción del total anual, se pudo otorgar la condición de extremo de forma errónea.

Para corroborar esto, se realiza un proceso de agregación de los meses Enero, Febrero y Marzo, y sobre este valor se vuelve a correr el *Range Check*. En las estaciones *Huancapi*, *Paras* y *Los Libertadores*, que presentan menor variabilidad entre sus valores en época lluviosa, ya no aparece ninguna etiqueta de valor sospechoso, sin embargo, en las estaciones *La Quinua* y *Túnel Cero*, aún se detectan un par de puntos remanentes como valores extremos (fig. A2-1).

Sin embargo, como se aprecia en el gráfico superpuesto de todos los histogramas (fig. 3.3-5a), todas las estaciones -con datos- presentan picos en los años en que el test ha detectado *outliers*, por lo que aunque estadísticamente estos pocos valores sean considerados fuera rango, es notorio que no se debe a malas mediciones u otros problemas externos, sino a condiciones climáticas medianamente atípicas que se desarrollaron en dichos años aislados, por lo que se decide mantener los valores para continuar con su procesamiento en el AED.



## Uso de data satelital

El estudio se apoya en la descarga o consulta online de data satelital, la cual es publicada por múltiples organismos y está a libre disposición para ser usada con fines científicos.

### Consulta de web-GIS online

Para poder visualizar y/o descarga información de mapas nacionales de las distintas variables analizadas, primero se debe obtener la dirección url del servidor WMS -Web Map Service- que se va a consultar. Esto se puede hacer de dos formas.

- a) Si el proveedor tiene registrada su información en un visualizador de una *geodatabase* conocida, entonces directamente se conecta a la base de datos, y se carga el mapa con su metadata incluida para consultar. En la fig. A3-1 se aprecia la conexión a *ArcGIS Online* para consultar el mapa geológico de Ayacucho.



Fig. A3-1 Conexión a ArcGIS Online para visualizar mapa geológico (elab. propia)

- b) Si el mapa consultado se encuentra en geodatabases sin visualizador, entonces se copia el enlace del WMS (por ejemplo, en la fig. A3-2 se aprecian algunos WMS en la página web del SENAMHI), y, mediante la opción de vinculación a WMS de ArcGIS se conecta al servidor (fig. A3-3), para luego poder cargar el mapa.



Fig. A3-2 Servidor WMS de SENAMHI (elab. propia)

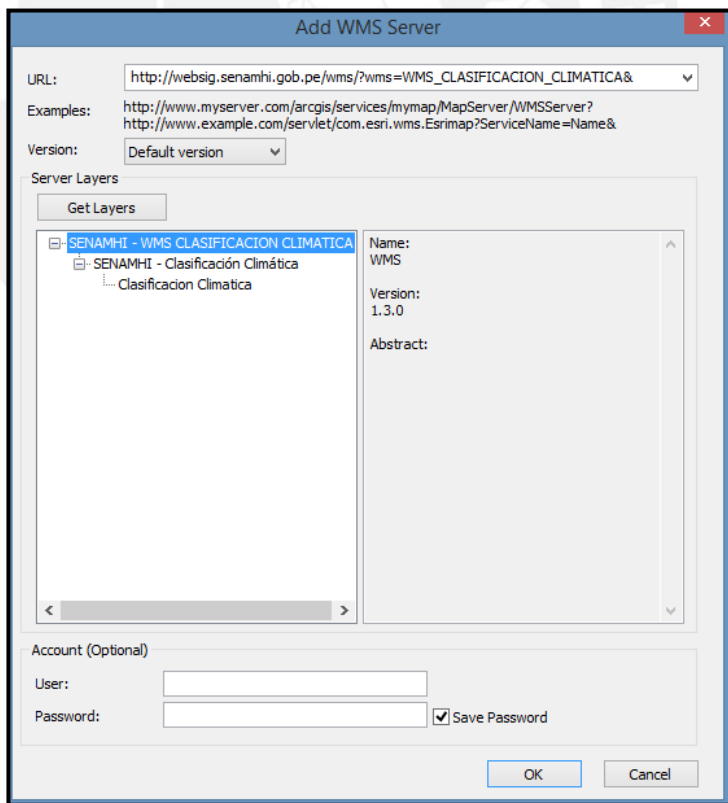


Fig. A3-3 Vinculación de WMS en ArcGIS (elab. propia)

## Descarga de imágenes satelitales

Para poder descargar imágenes georreferenciadas de altas resolución, se hace uso del SAS-Planet (fig. A3-4), el cual es un aplicativo ruso ampliamente difundido en la actualidad, que cuenta con conexiones a decenas de servidores públicos, tales como Google Satellite, Bing Roads, Yahoo Maps, entre otros. Para poder descargar la imagen que se usó en la tesis, se delimita el área de influencia de la cuenca Champacocha, y una vez en las opciones se clickea el servidor Google Satellite, y se designa el formato vectorial ecw para el archivo de salida. Antes de terminar se elige el archivo georreferenciador con extensión .map en la ventana final, y se inicia con la descarga.

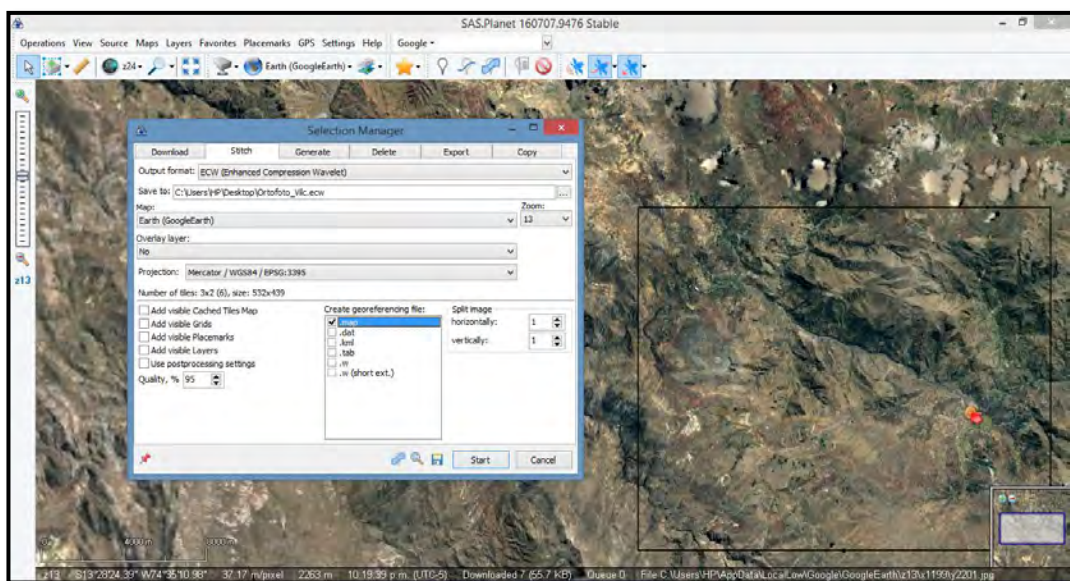


Fig. A3-4 Descarga de imagen satelital en SAS-Planet (elab. propia)

## **ANEXO II:**

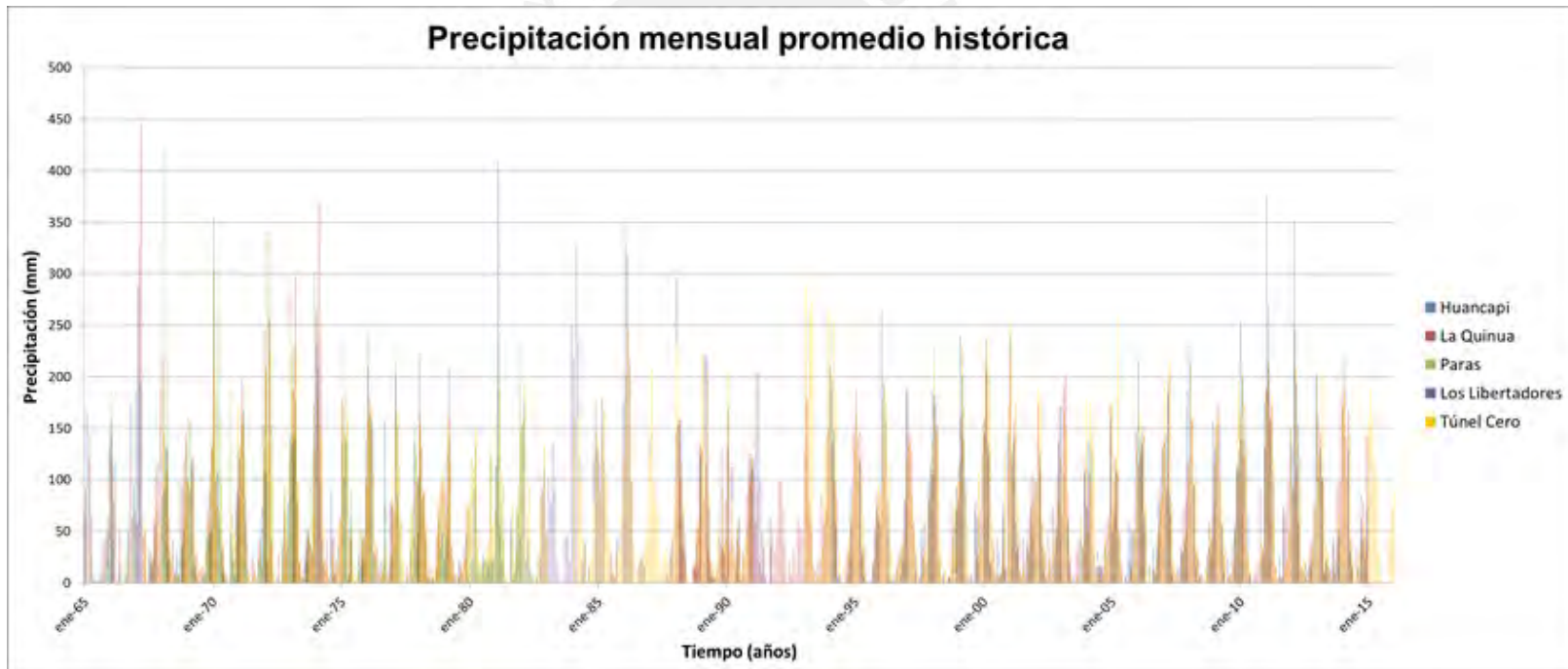
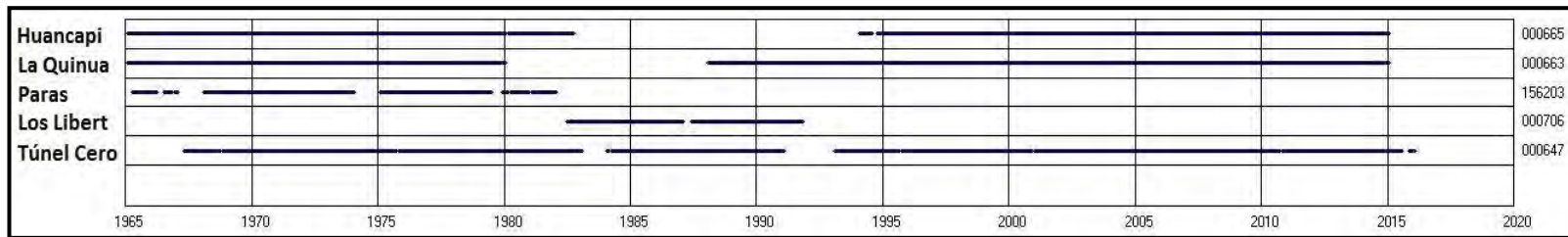
# **GRÁFICOS TOTALES**

- ***Histogramas, cronogramas y box plot***
- ***Curvas de Doble Masa restantes***
- ***Series de tiempo finales por integración espacial***
- ***Curvas efectivas Cota – Área – Volumen***
- ***Curva de persistencia global***

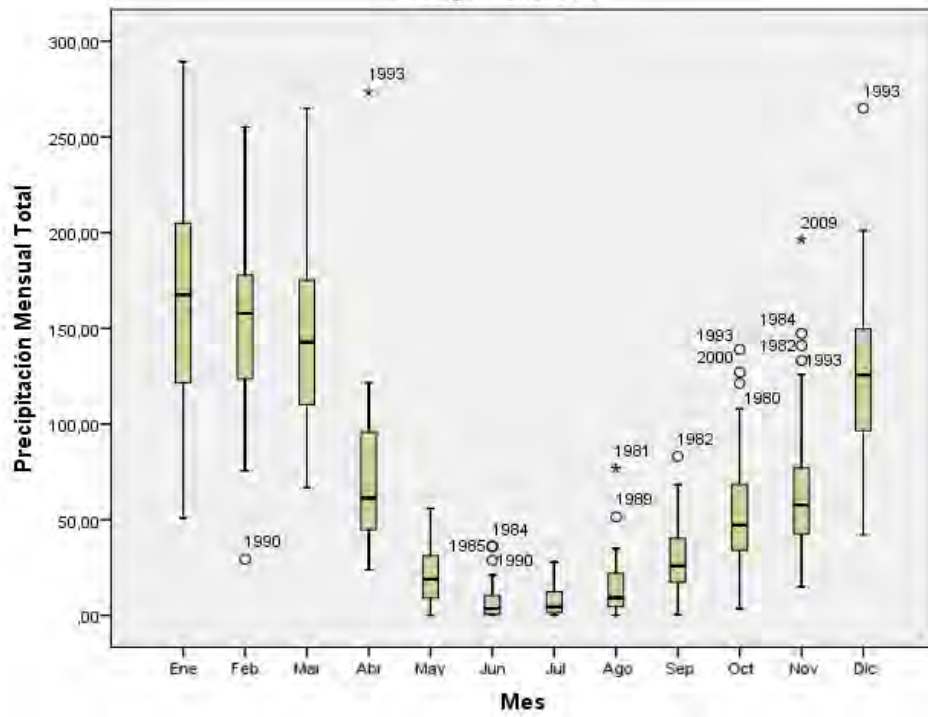
# **HISTOGRAMAS, CRONOGRAMAS Y BOX PLOT**



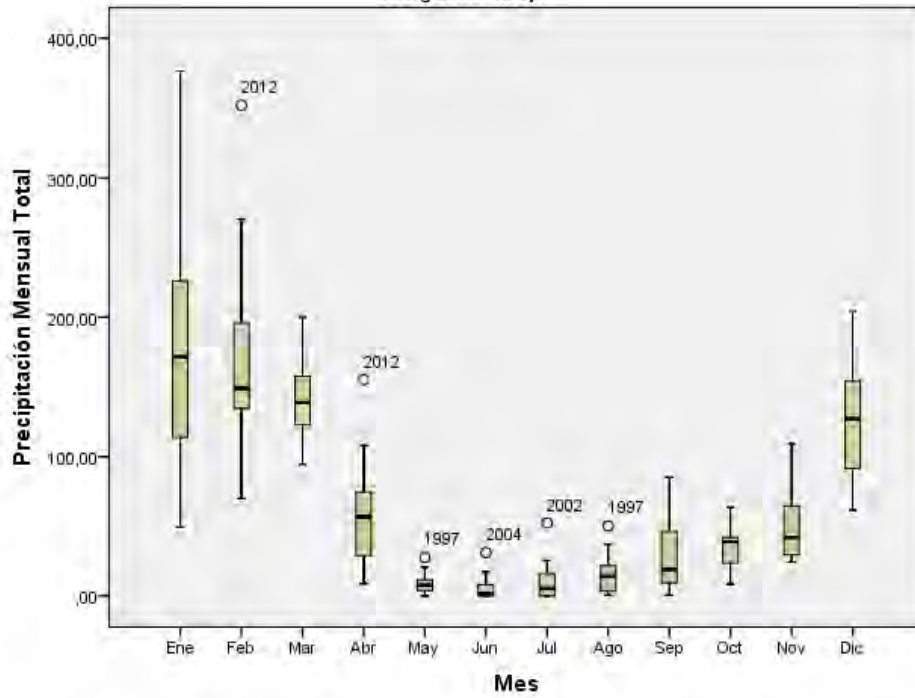
## Precipitación promedio

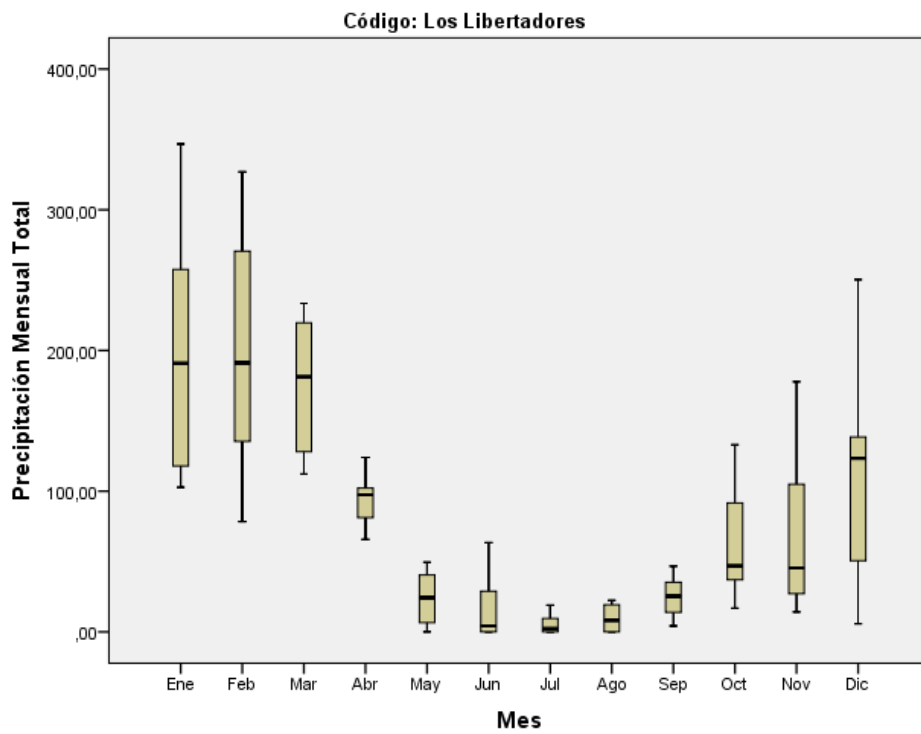
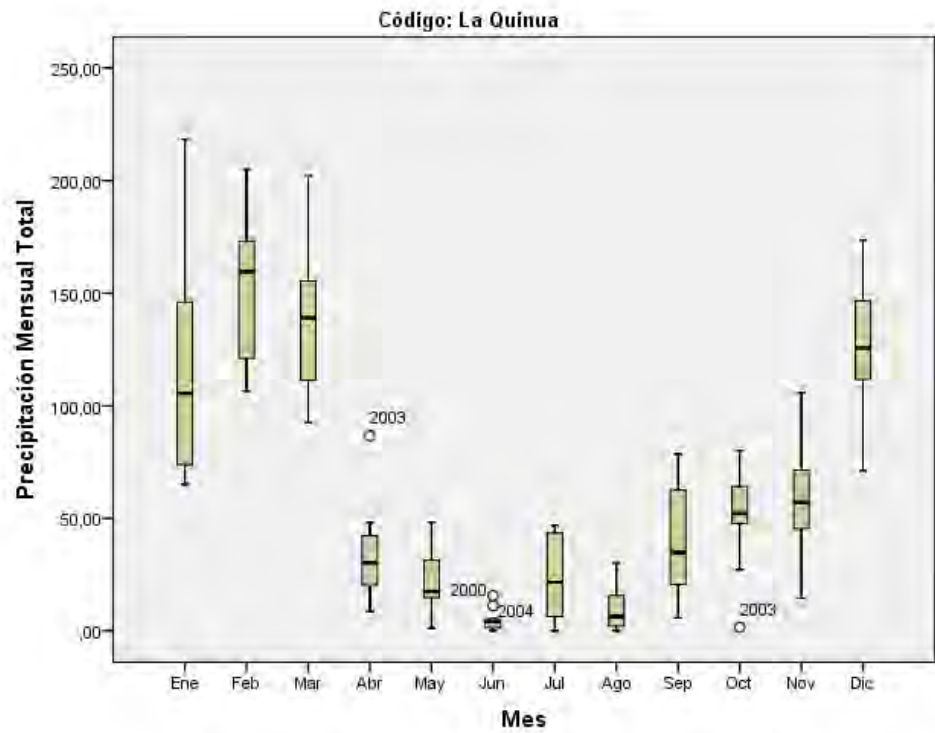


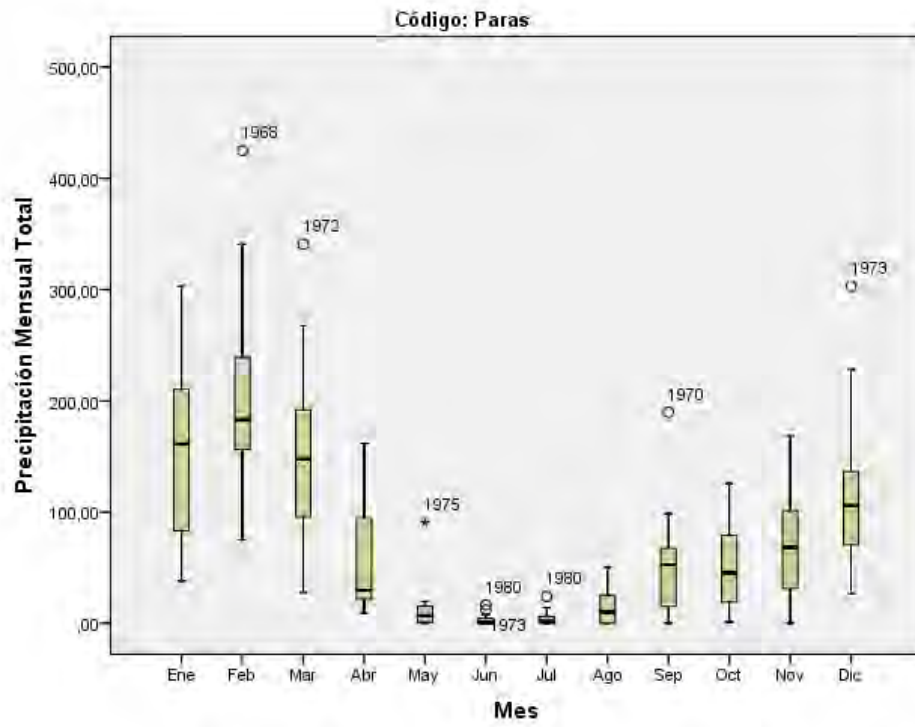
Código: Túnel Cero



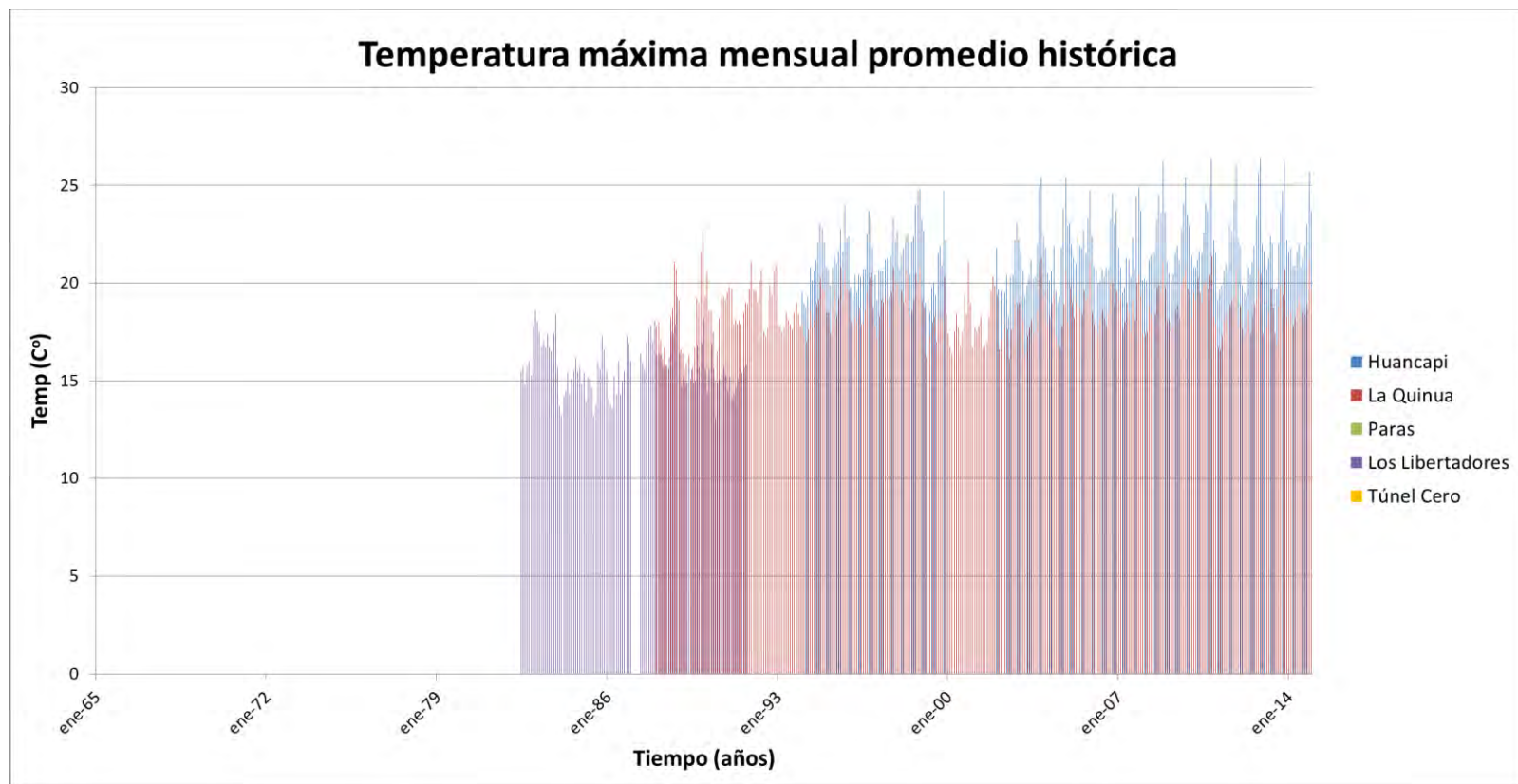
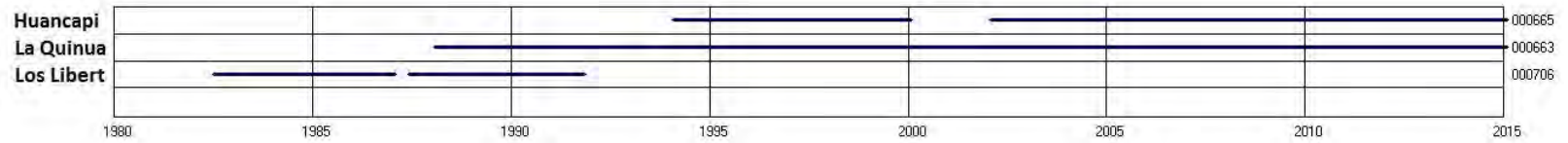
Código: Huancapi

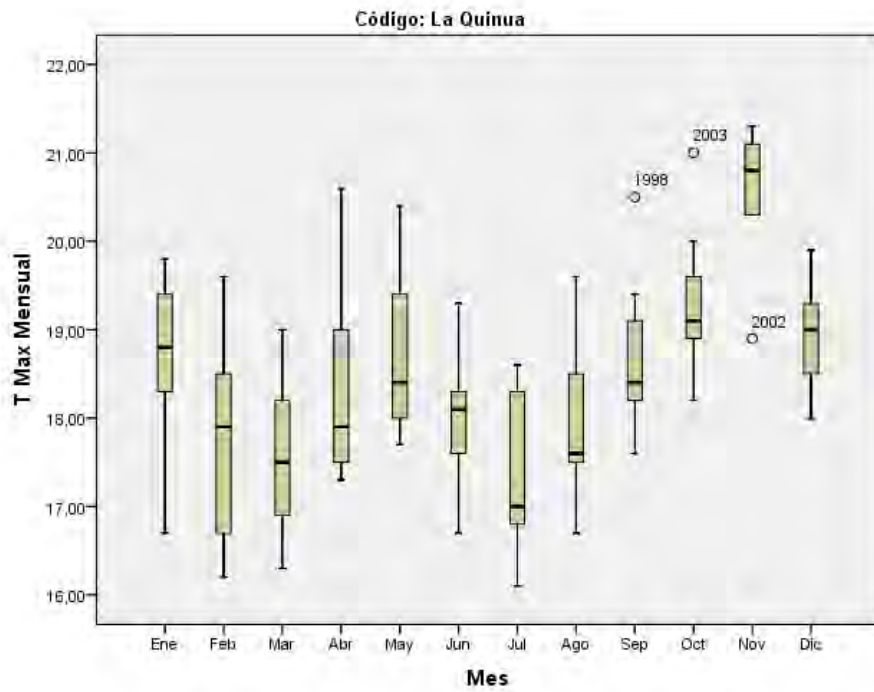
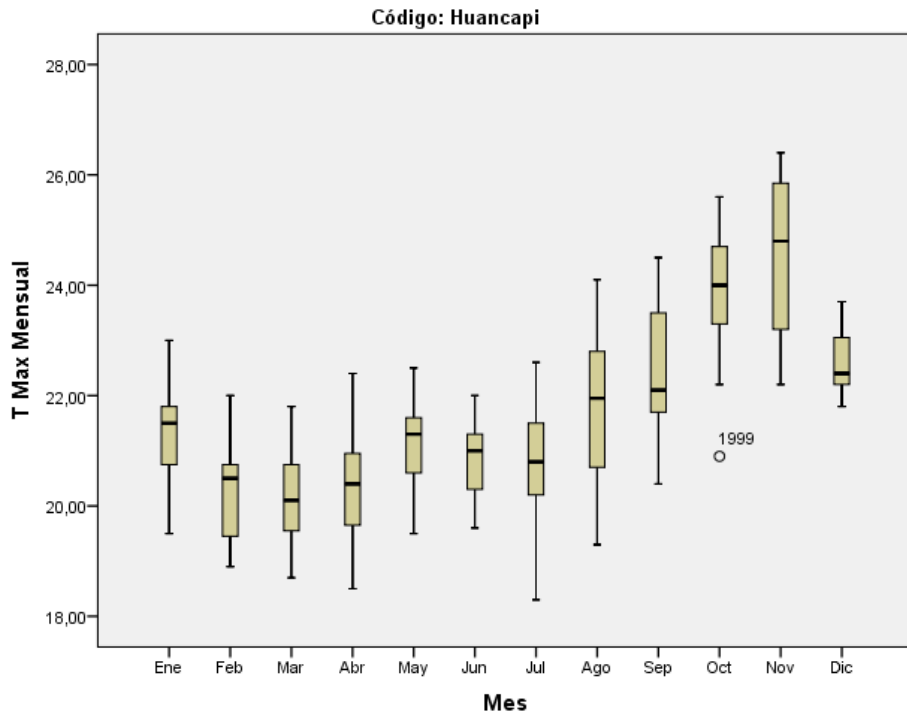


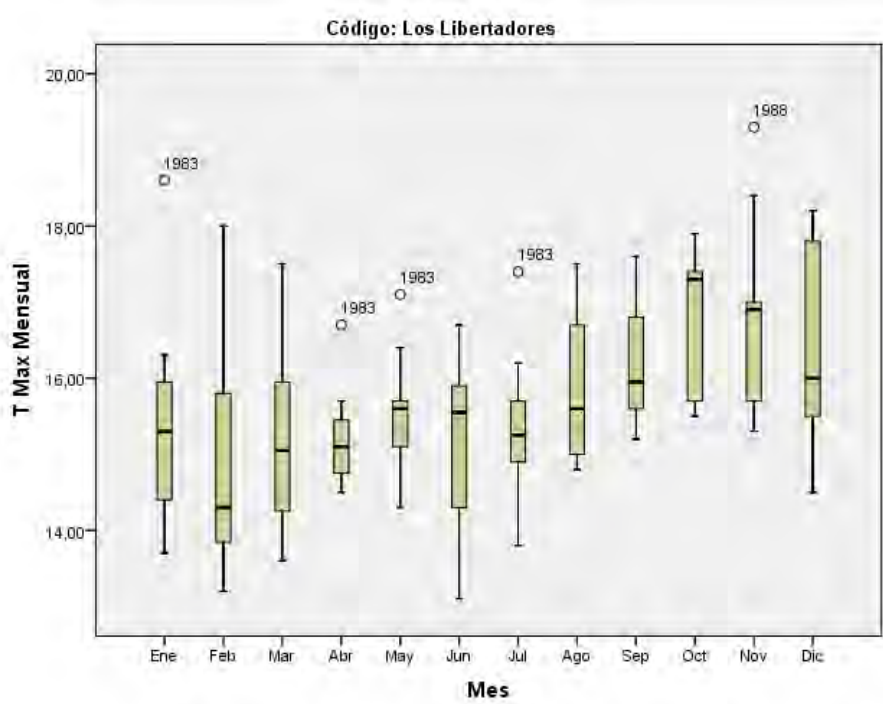




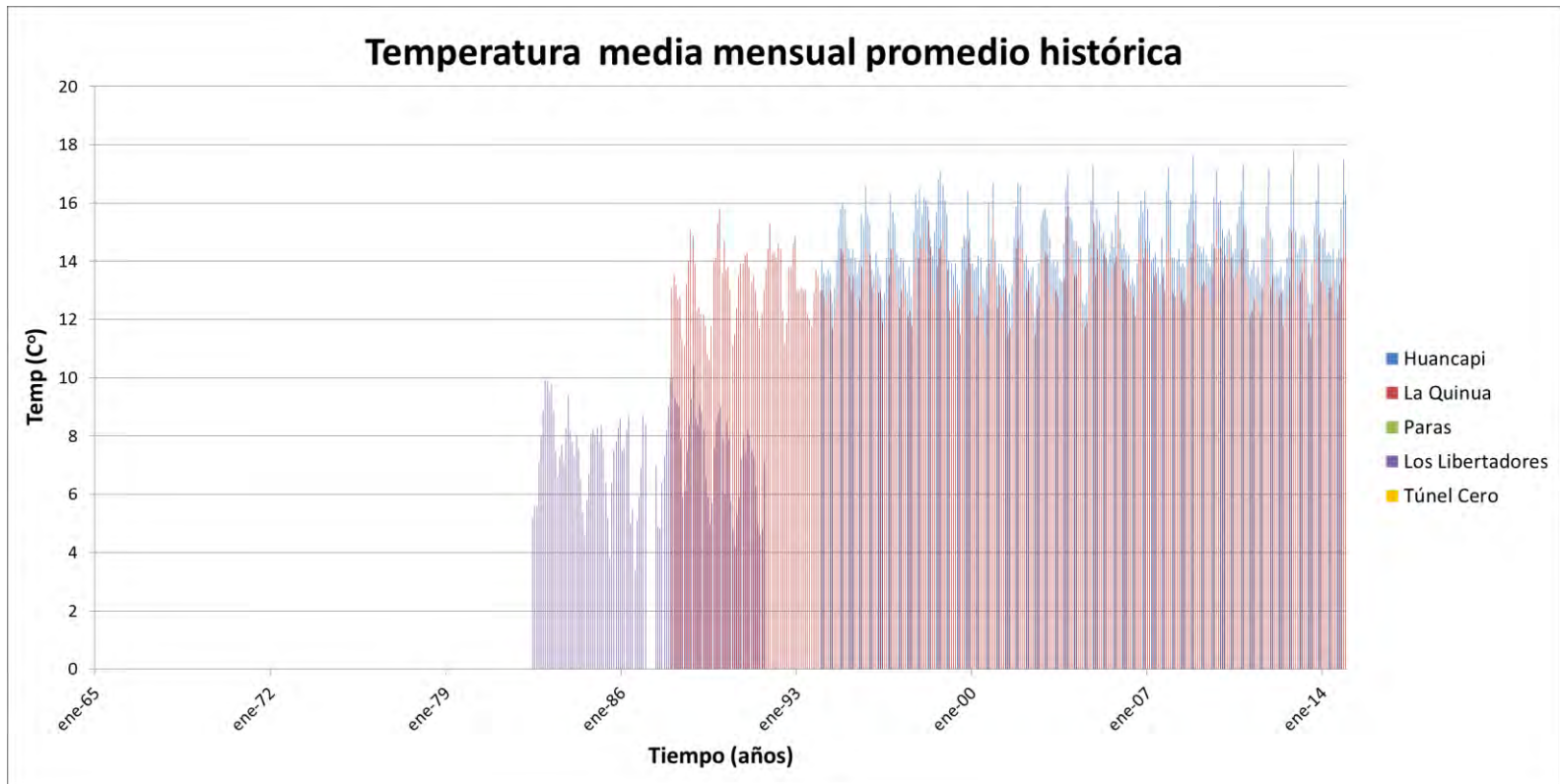
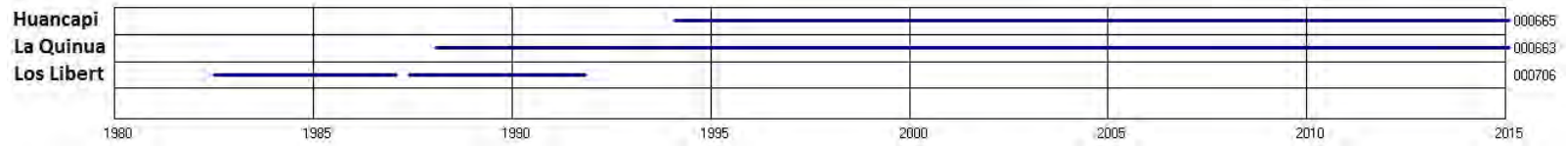
# Temperatura máxima

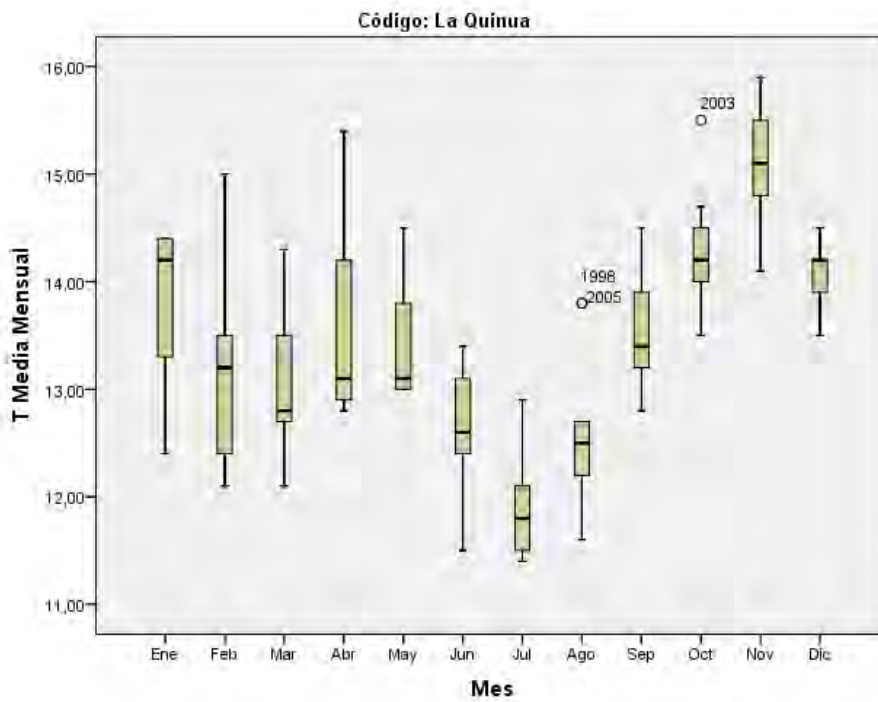
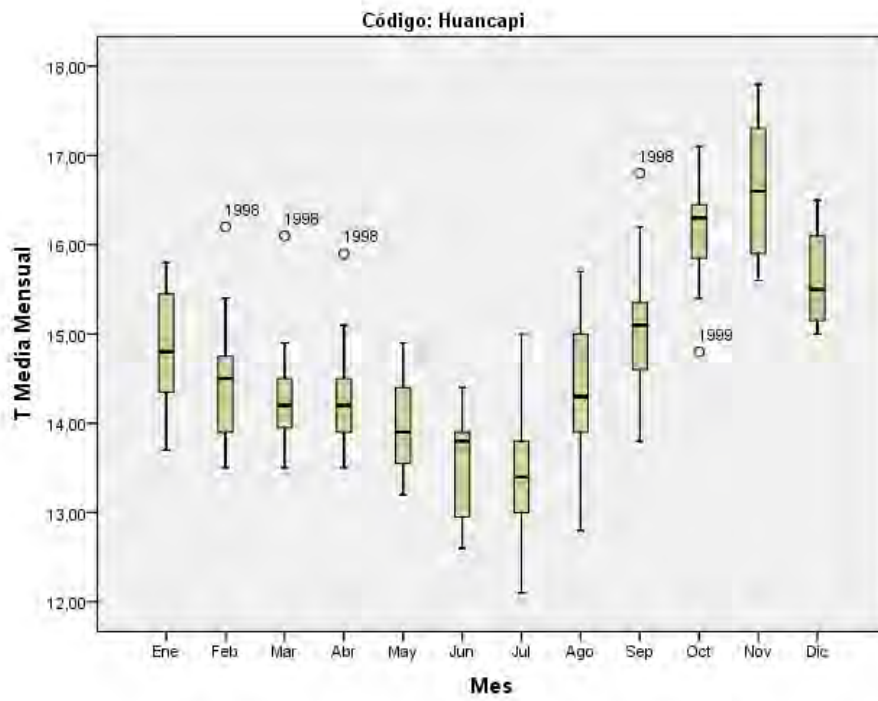




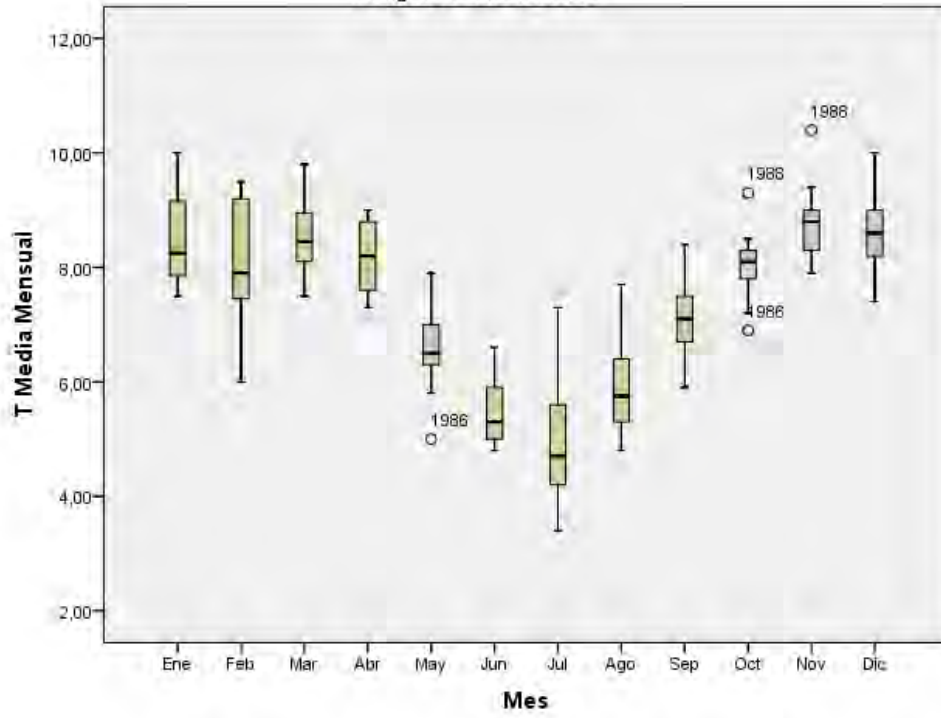


## Temperatura media

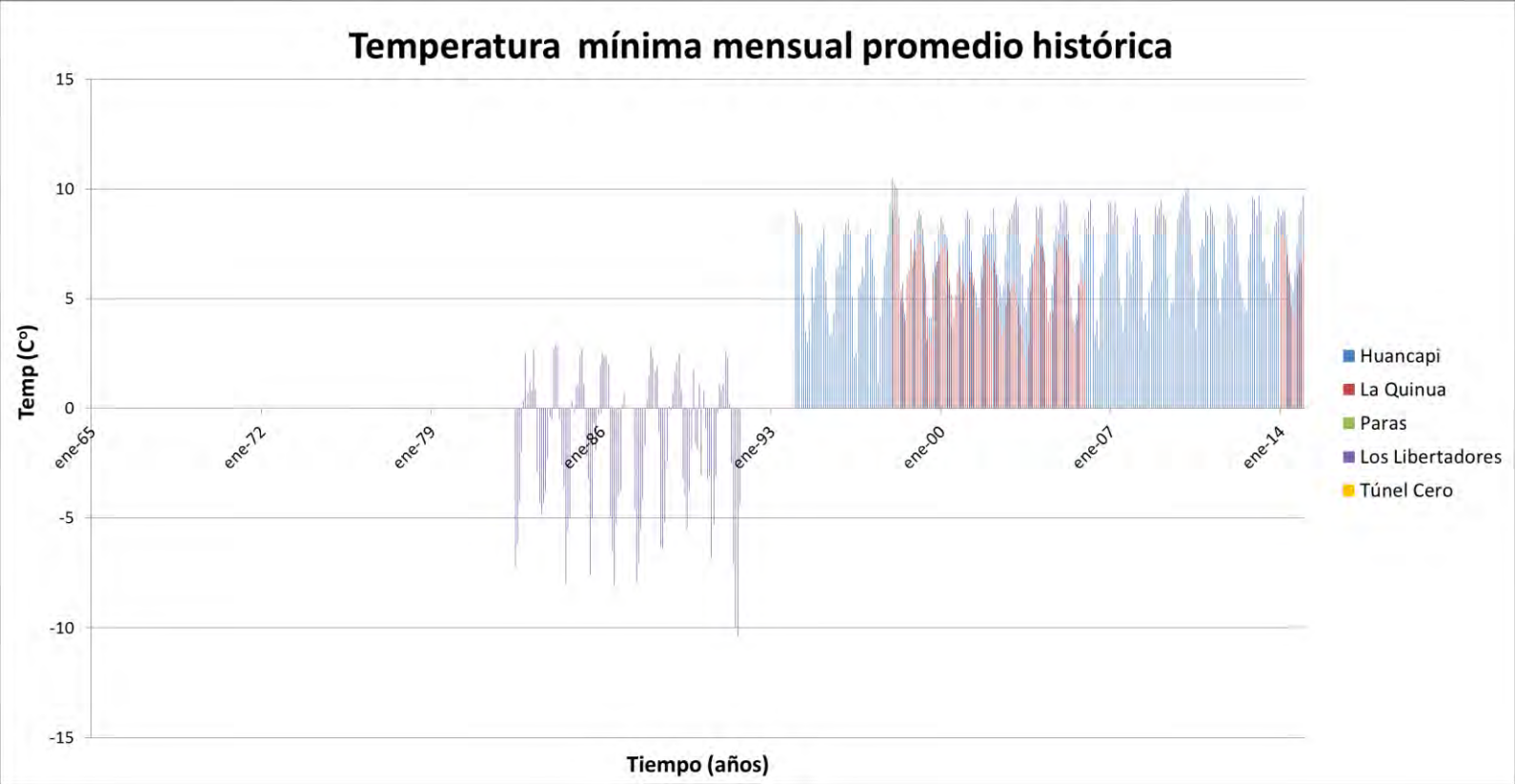
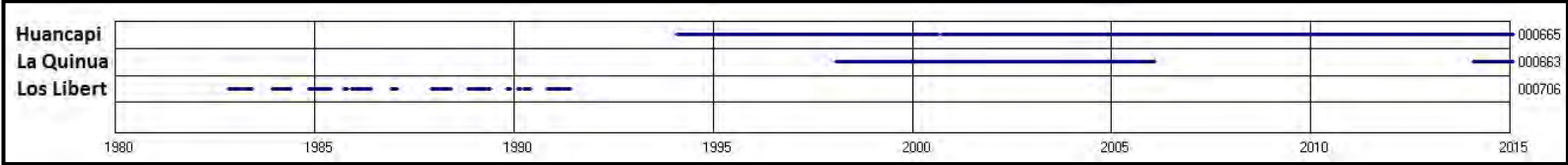


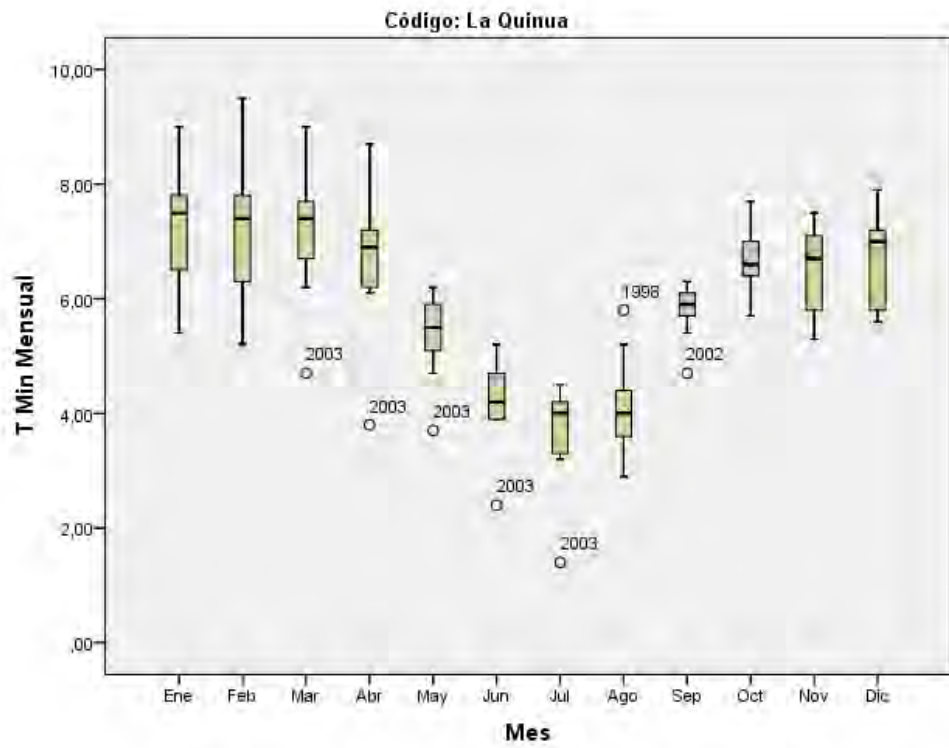
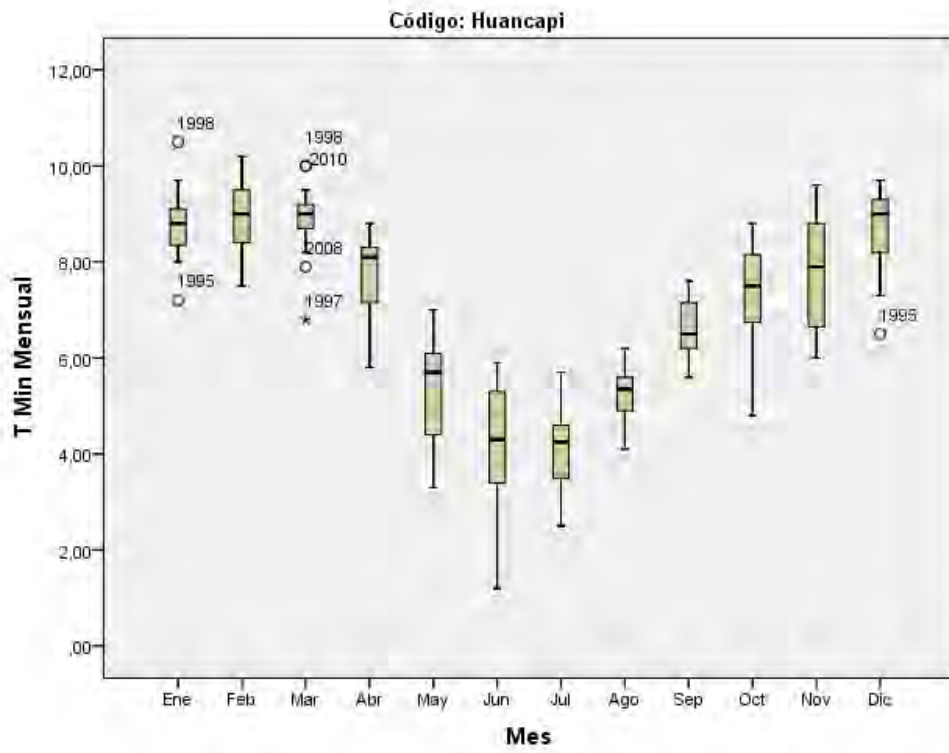


Código: Los Libertadores

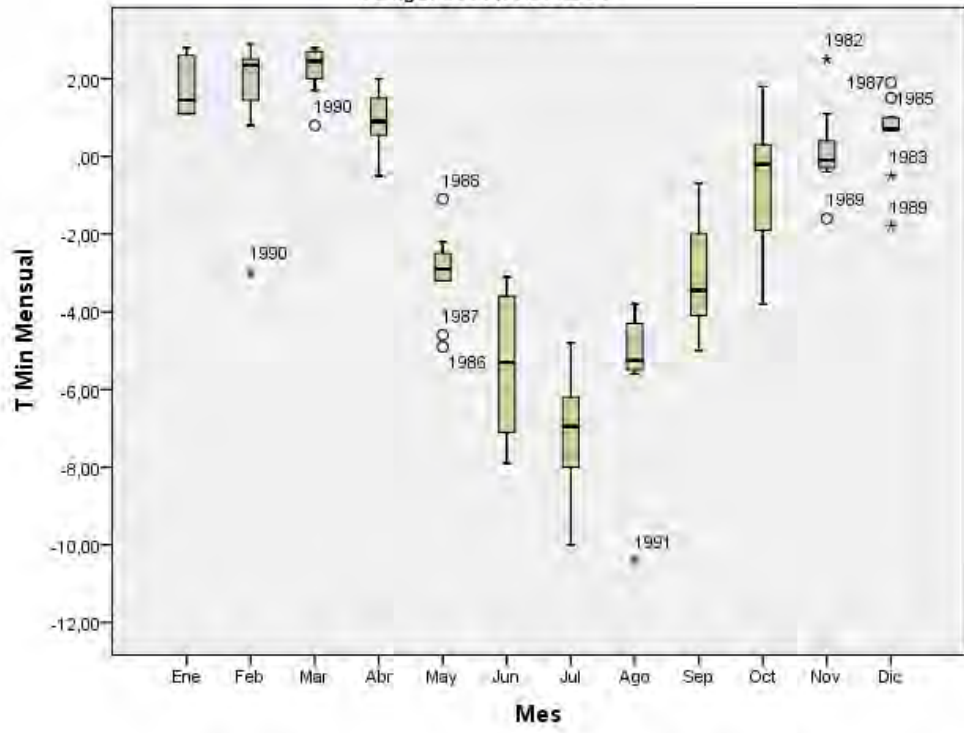


# Temperatura mínima





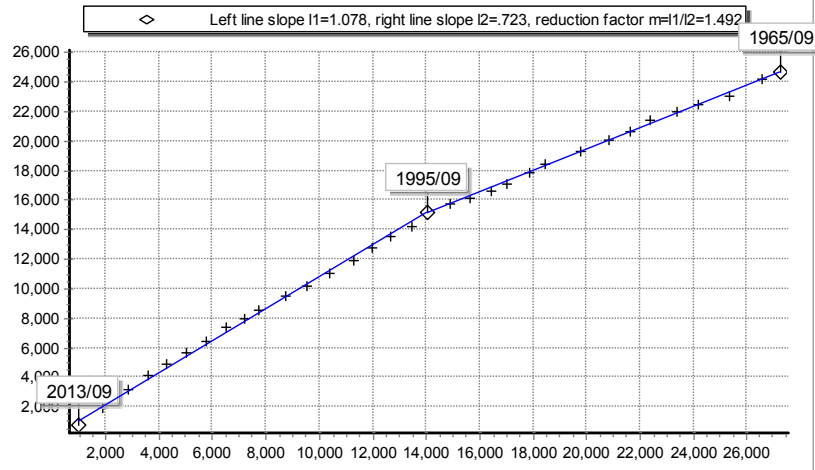
Código: Los Libertadores



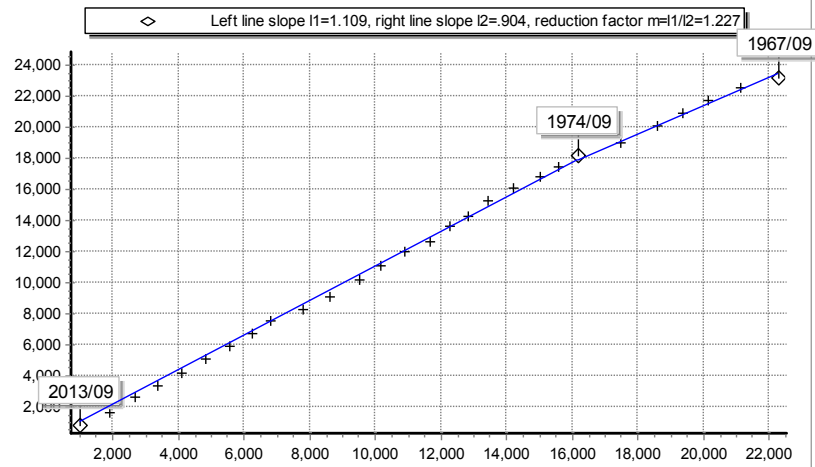


**CURVAS DE DOBLE MASA  
RESTANTES**

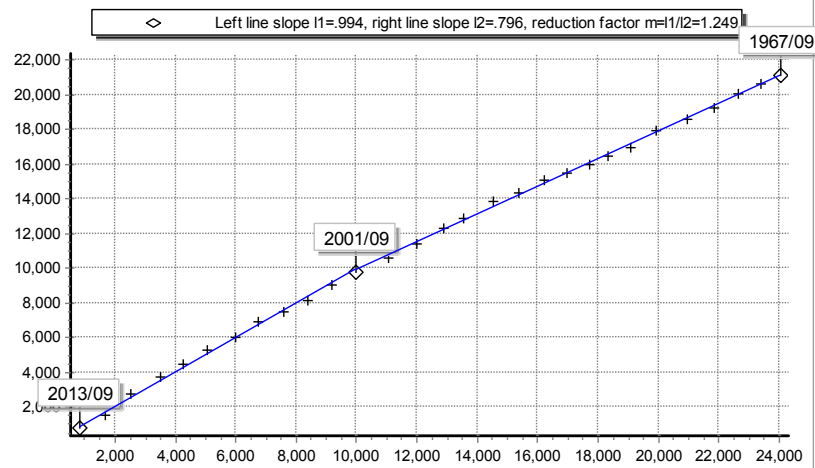
## La Quinoa vs Huancapi



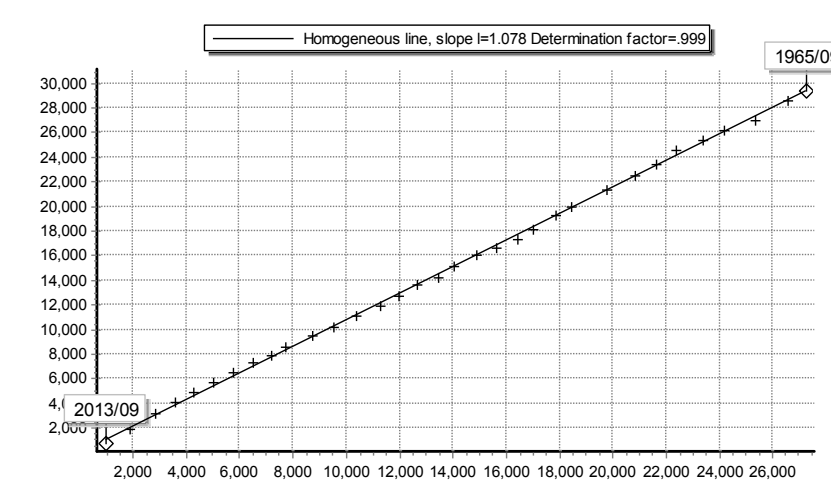
## La Quinoa vs Túnel Cero



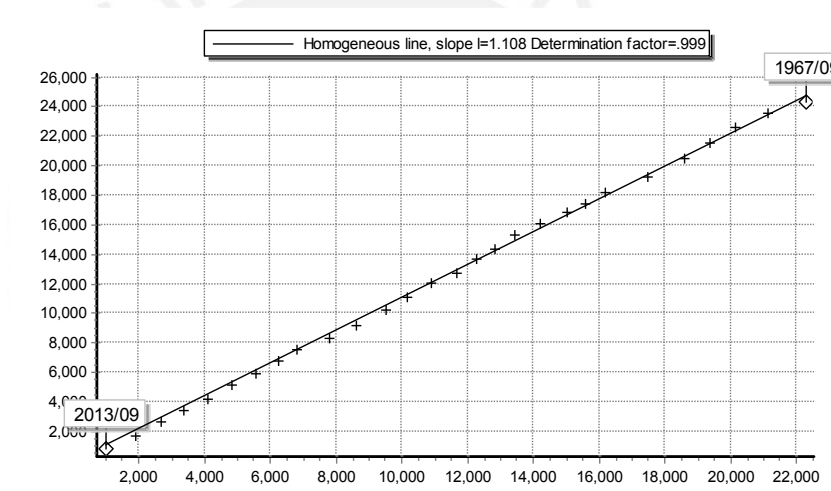
## Túnel Cero vs Huancapi



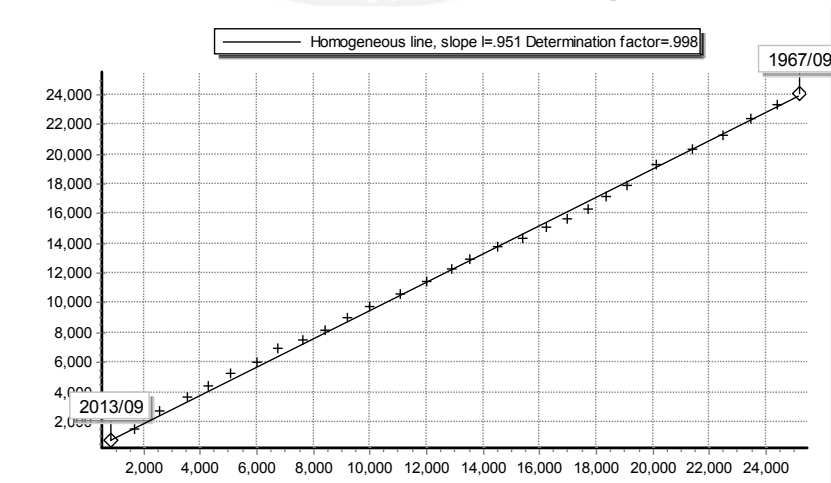
### La Quinoa vs Huancapi HMG



### La Quinoa vs Túnel Cero HMG



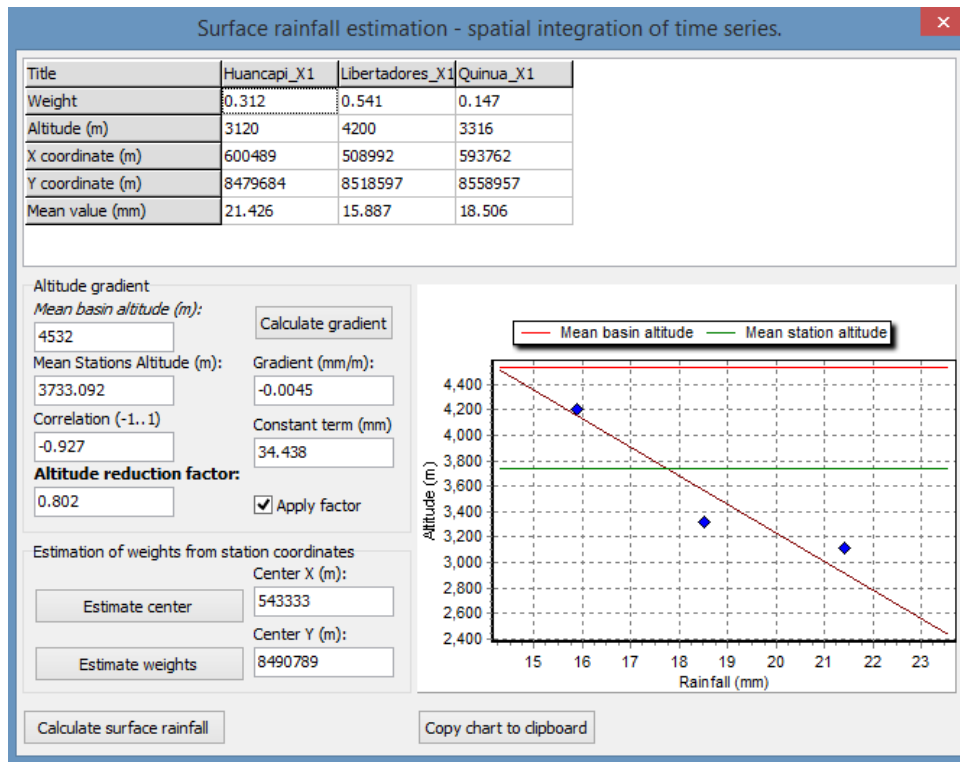
### Túnel Cero HMG vs Huancapi HMG



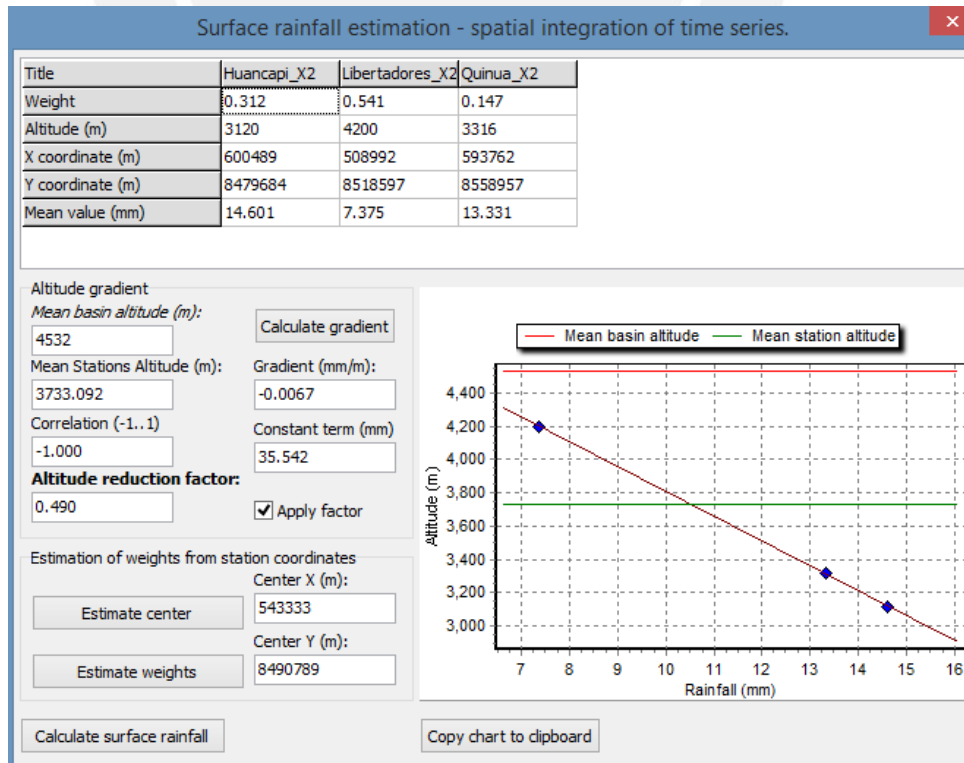
**CONFIGURACIONES Y SERIES DE  
TIEMPO FINALES POR  
INTEGRACIÓN ESPACIAL**



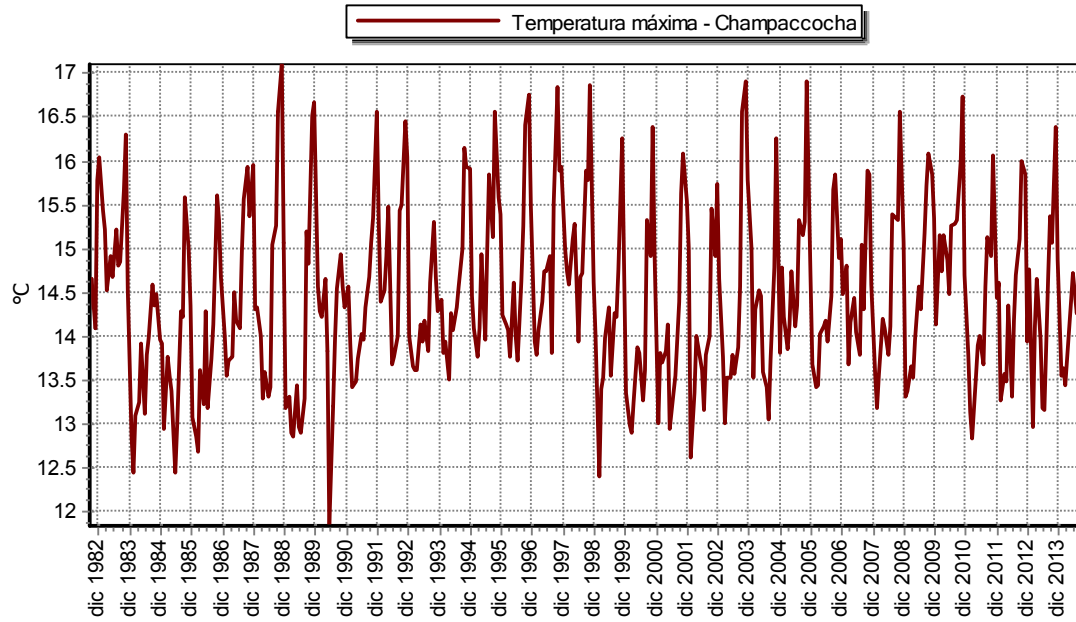
## Cuadro de integración espacial de la Temperatura Máxima



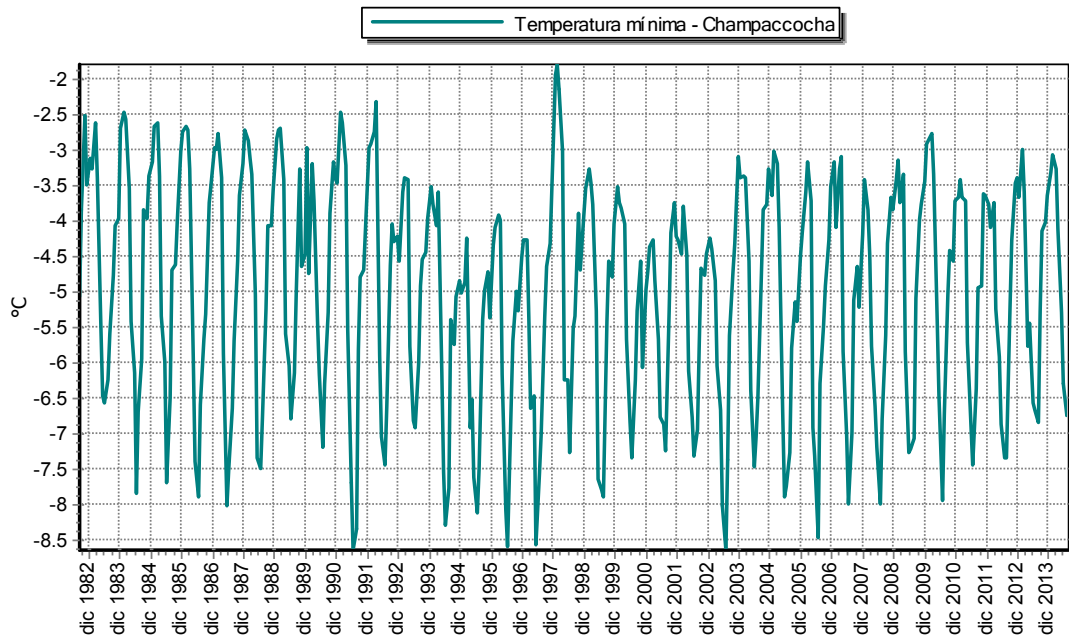
## Cuadro de integración espacial de la Temperatura Media



## Serie temporal final de Temperatura Máxima



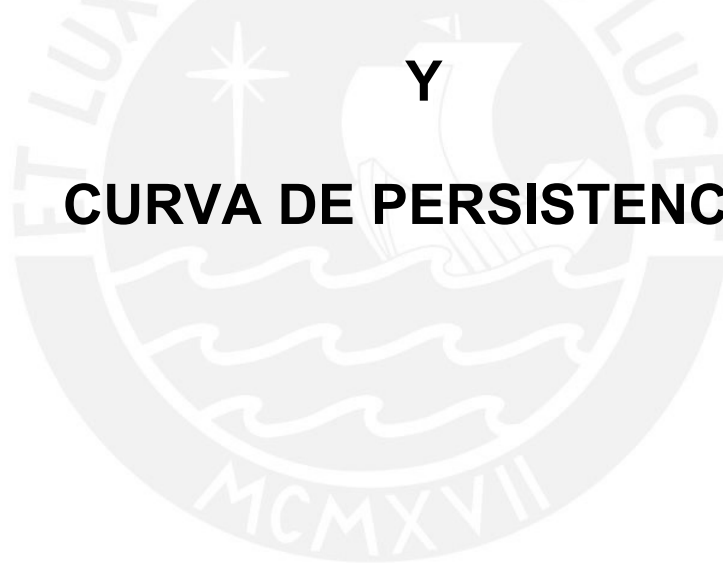
## Serie temporal final de Temperatura Mínima



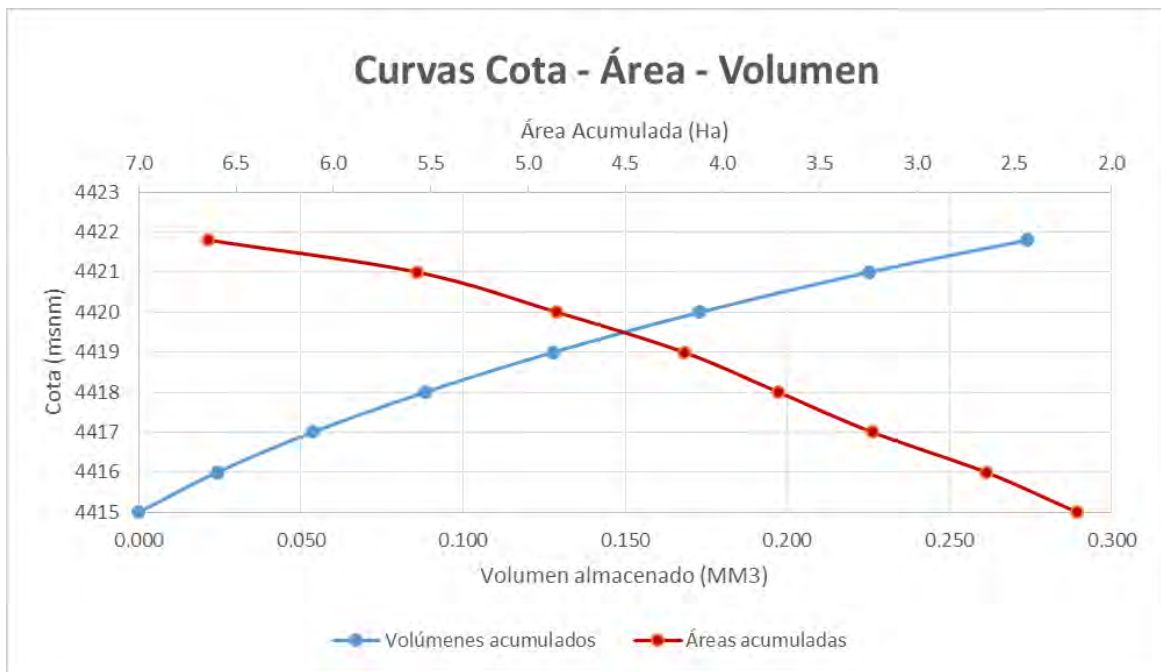
**CURVAS EFECTIVAS  
COTA-ÁREA-VOLUMEN**

**Y**

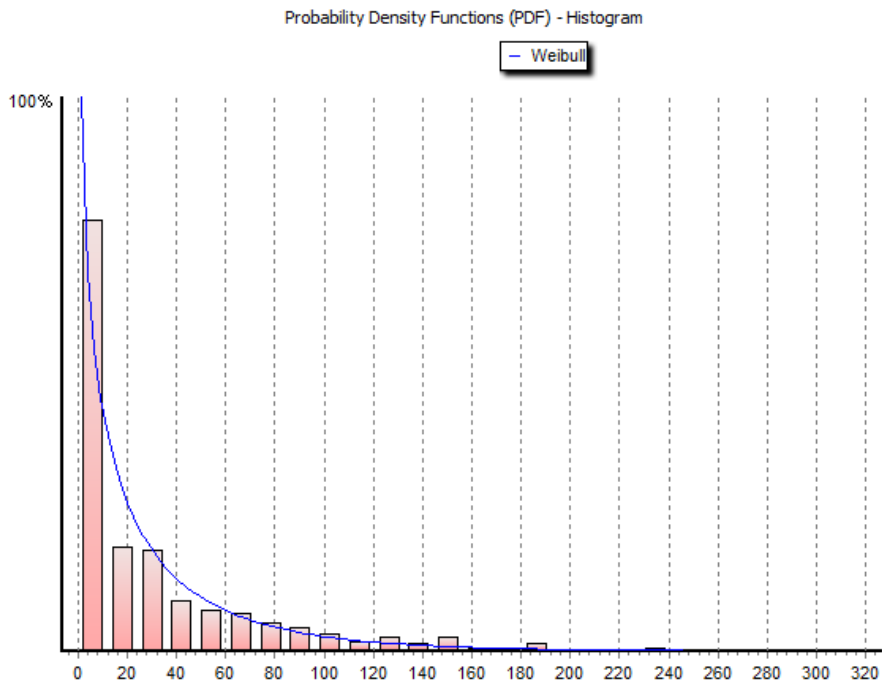
**CURVA DE PERSISTENCIA**



## **Curvas Cota – Área – Volumen de la capacidad activa del embalse Champacocha**



## **Curva de persistencia global de la escorrentía de la Cuenca Champacocha**

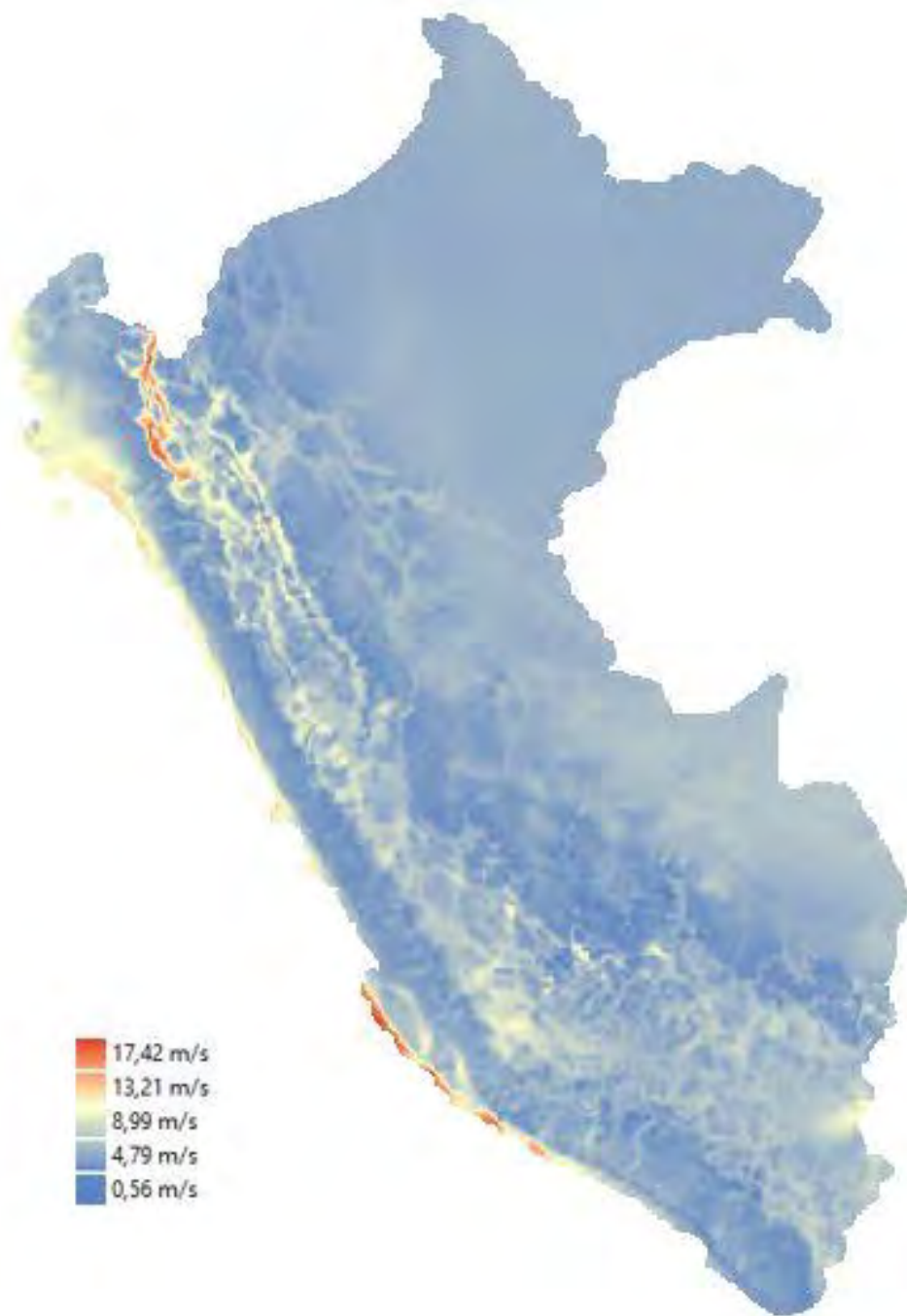


# **ANEXO III: MAPAS NACIONALES**

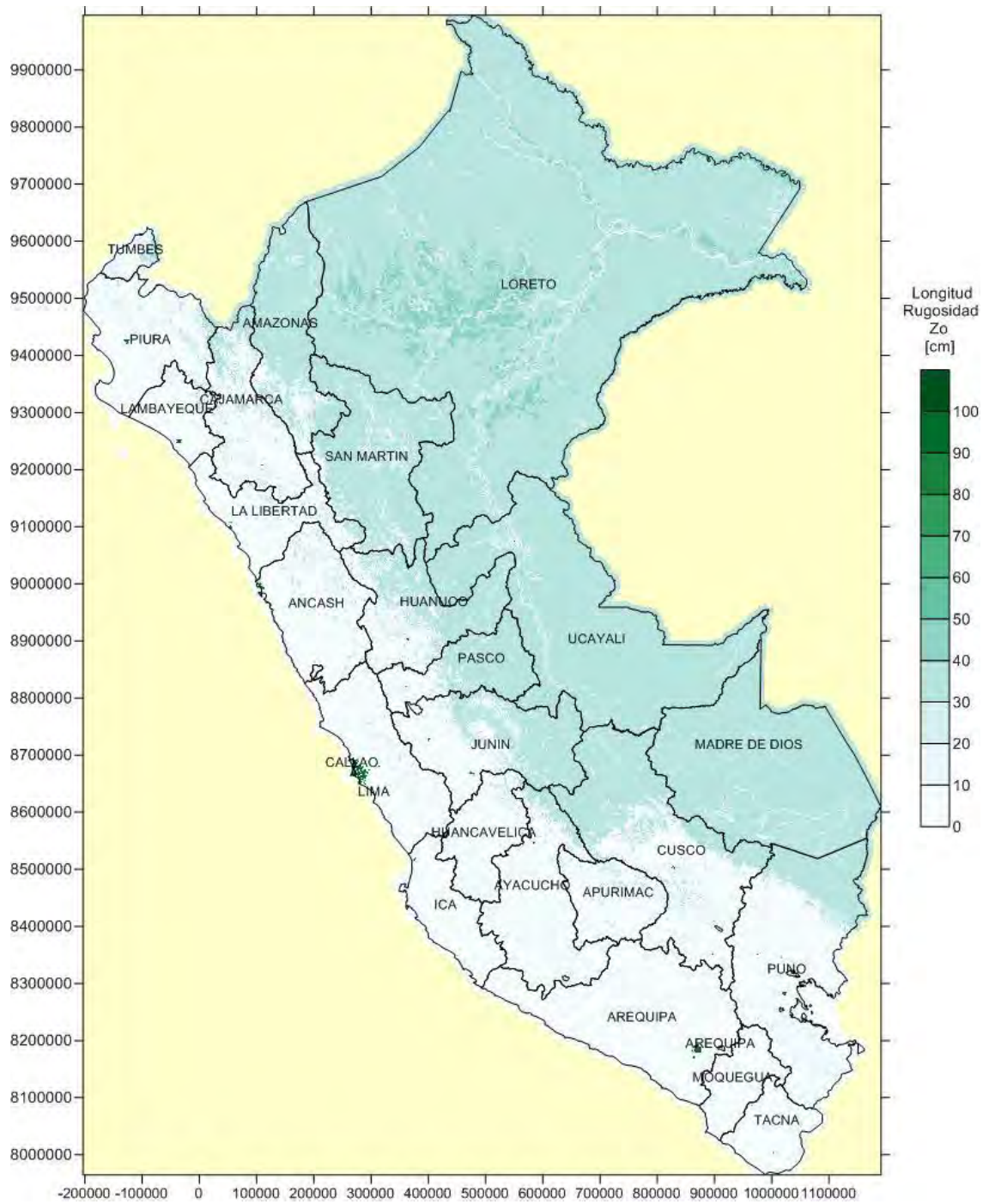
- **Mapas de variables naturales**
- **Mapas climáticos multianuales 1965 -2006**
- **Mapas de cambio climático – variación del clima proyectado para el año 2030**



**MAPAS NACIONALES DE  
VARIABLES NATURALES**



**MV-1.** Mapa de Velocidad media del viento a 150m de la superficie  
(Fuente: MINEM)



**MV-2.** Mapa de Rugosidad Superficial (Fuente: MINEM)



**Legend**

- Acrisol háplico - Acrisol háplico - Lixisol háplico  
Nival Subtropical
- Acrisol háplico - Acrisol háplico - Luvisol crómico  
Nival Templado cálido
- Arenosol háplico - Solonchak háplico  
Nival Tropical
- Cambisol dístico - Acrisol háplico  
bosque espino Subtropical
- Cambisol dístico - Acrisol háplico - Lixisol háplico  
bosque húmedo Subtropical
- Cambisol dístico - Acrisol háplico  
bosque pluvial Montano Subtropical
- Cambisol dístico - Nitisol háplico  
bosque pluvial semisaturado Subtropical
- Cambisol éútrico - Phaeozem háplico  
bosque seco Tropical
- Cambisol éútrico - Vertisol éútrico  
desierto arido montano Subtropical
- Fluvisol éútrico - Gleysol éútrico
- Fluvisol éútrico - Regosol éútrico
- desierto perarido Montano Bajo Subtropical  
Gleysol dístico - Cambisol dístico
- desierto superarido Tropical  
Gleysol dístico - Histosol lítico
- estepa Montano Subtropical  
Gleysol dístico - Lixisol háplico - Fluvisol dístico
- matorral desértico Tropical  
Leptosol dístico - Afloramiento lítico
- matorral espinoso Andino  
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico
- matorral pluvial semisaturado Subandino Subtropical  
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico - Regosol éútrico
- tundra húmeda Alpina Templado cálido  
Leptosol dístico - Regosol dístico - Afloramiento lítico
- Leptosol lítico - Afloramiento lítico
- Leptosol éútrico - Afloramiento lítico
- Leptosol éútrico - Cambisol éútrico
- Leptosol éútrico - Cambisol éútrico - Regosol éútrico
- Leptosol éútrico - Kastanozem háplico - Afloramiento lítico
- Leptosol éútrico - Regosol éútrico - Afloramiento lítico
- Lixisol háplico - Gleysol dístico
- Luvisol crómico - Cambisol éútrico
- Regosol dístico - Afloramiento lítico
- Regosol dístico - Cambisol dístico
- Regosol éútrico - Andosol móllico
- Regosol éútrico - Calcisol háplico
- Regosol éútrico - Cambisol éútrico
- Solonchak háplico - Leptosol éútrico

**MV.3. Mapa Ecológico del Perú – Zonas de vida (Fuente: ONERN)**



**Legend**

- Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico
- Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol crómico
- Arenosol háplico - Solonchak háplico
- Cambisol distríco - Acrisol háplico
- Cambisol distríco - Acrisol háplico - Lixisol háplico
- Cambisol distríco - Alisol háplico
- Cambisol distríco - Nitisol háplico
- Cambisol éutrico - Phaeozem háplico
- Cambisol éutrico - Vertisol éutrico
- Fluvisol éutrico - Gleysol éutrico
- Fluvisol éutrico - Regosol éutrico
- Gleysol distríco - Cambisol distríco
- Gleysol distríco - Histosol fibríco

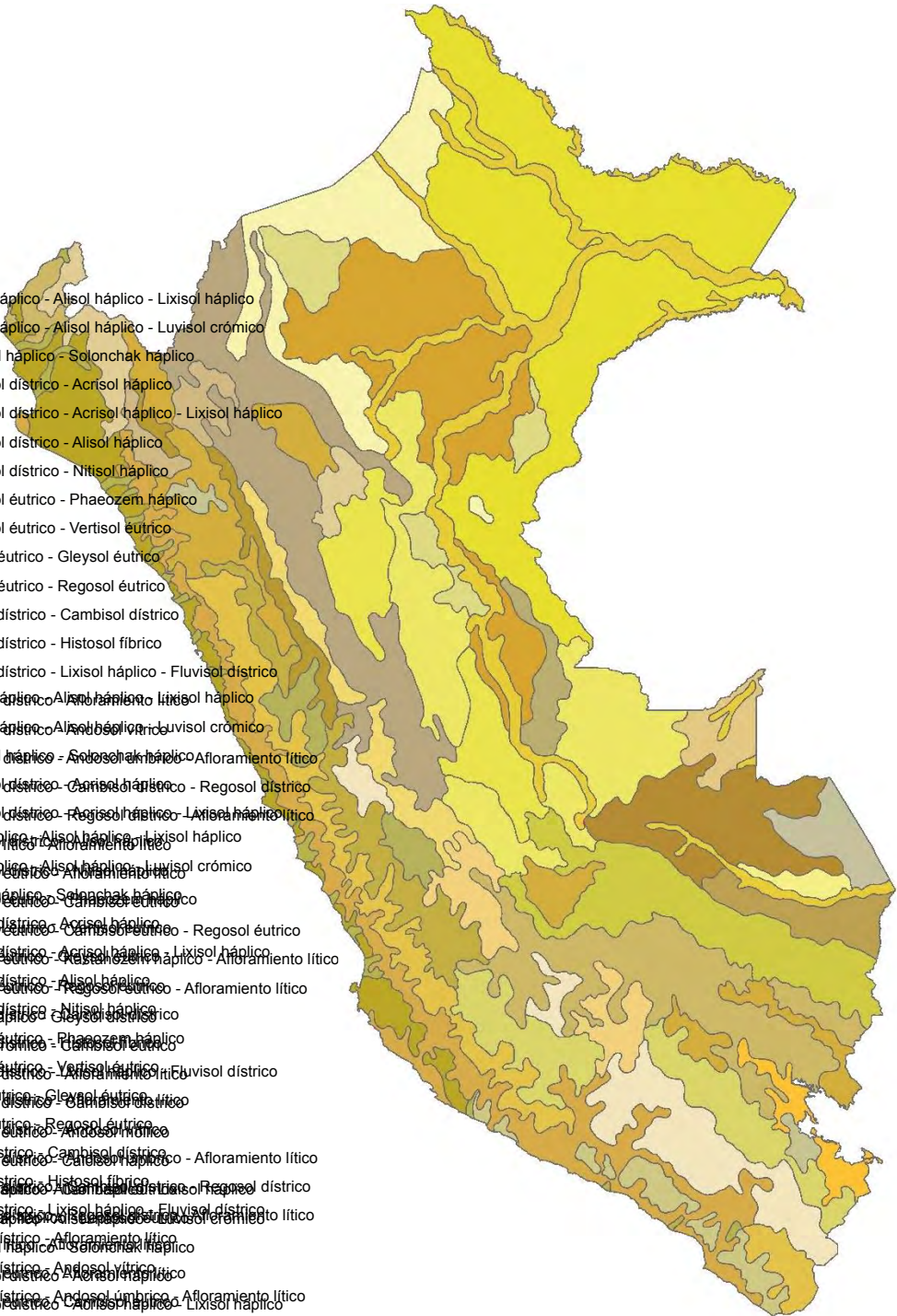
**Legend**

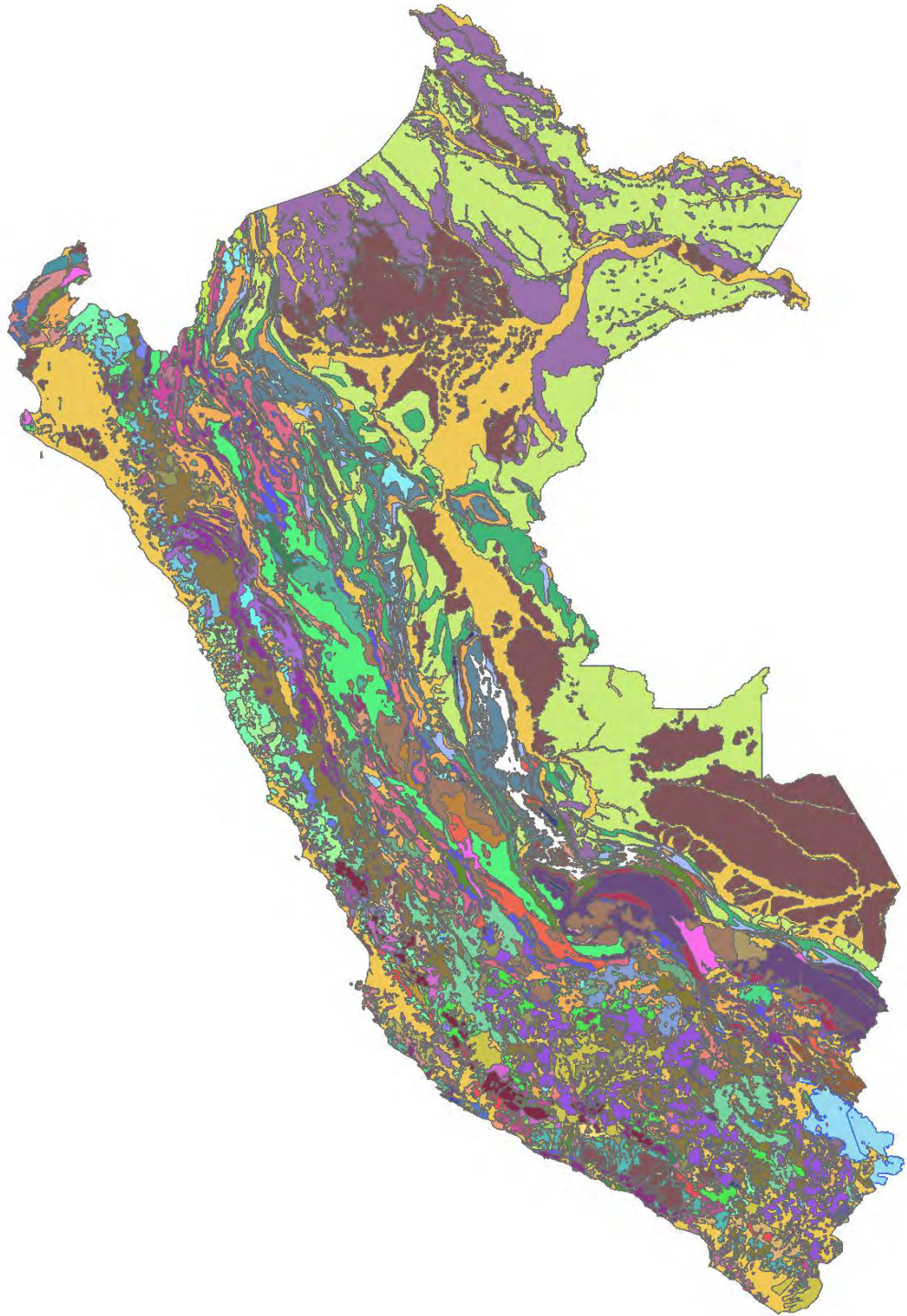
- Gleysol distríco - Lixisol háplico - Fluvisol distríco
- Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico
- Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol crómico
- Arenosol háplico - Solonchak háplico - Afloramiento lítico
- Cambisol distríco - Cambisol háplico - Regosol distríco
- Cambisol distríco - Acrisol háplico - Lixisol háplico

**Legend**

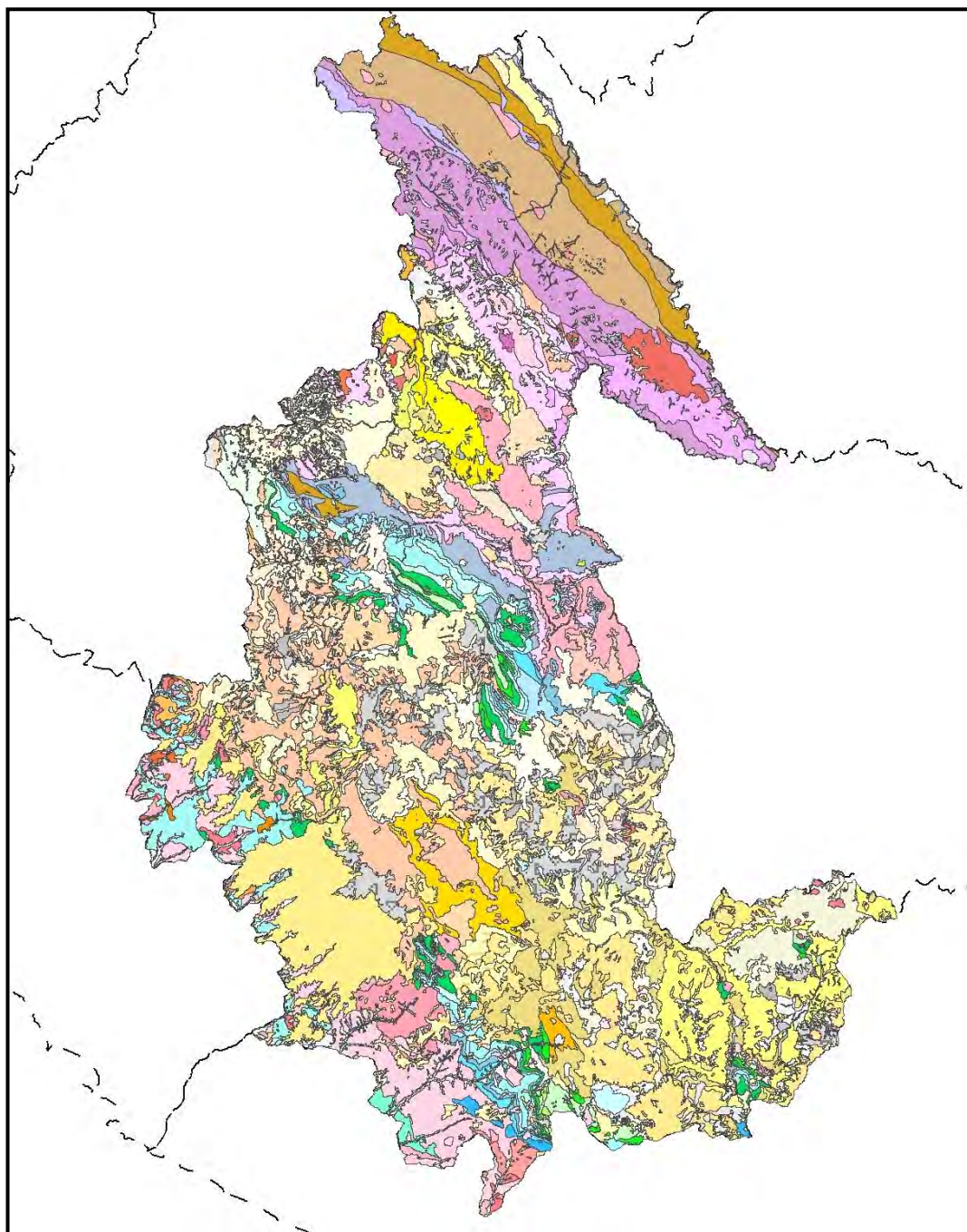
- Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico
- Leptosol lítico - Afloramiento lítico
- Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol crómico
- Leptosol éutrico - Afloramiento lítico
- Arenosol háplico - Solonchak háplico
- Cambisol éutrico - Cambisol éutrico - Regosol éutrico
- Cambisol éutrico - Acrisol háplico - Lixisol háplico
- Cambisol éutrico - Phaeozem háplico - Afloramiento lítico
- Cambisol éutrico - Nitisol háplico
- Cambisol éutrico - Cambisol éutrico
- Cambisol éutrico - Phaeozem háplico
- Cambisol éutrico - Vertisol éutrico
- Regosol distríco - Afloramiento lítico - Fluvisol distríco
- Fluvisol éutrico - Cambisol éutrico
- Regosol éutrico - Afloramiento lítico
- Fluvisol distríco - Cambisol distríco - Afloramiento lítico
- Gleysol distríco - Histosol fibríco
- Regosol distríco - Afloramiento lítico
- Gleysol distríco - Lixisol háplico - Fluvisol distríco
- Arenosol háplico - Solonchak háplico
- Leptosol distríco - Andosol úmbrico
- Cambisol éutrico - Andosol úmbrico - Afloramiento lítico
- Cambisol éutrico - Cambisol háplico - Lixisol háplico
- Leptosol distríco - Cambisol distríco - Regosol éutrico
- Cambisol éutrico - Cambisol háplico - Afloramiento lítico
- Leptosol lítico - Afloramiento lítico
- Cambisol éutrico - Phaeozem háplico - Afloramiento lítico
- Leptosol éutrico - Afloramiento lítico
- Cambisol éutrico - Vertisol éutrico
- Leptosol éutrico - Cambisol éutrico - Regosol éutrico
- Leptosol éutrico - Cambisol éutrico
- Leptosol éutrico - Kastanozem háplico - Afloramiento lítico
- Leptosol éutrico - Regosol éutrico - Afloramiento lítico
- Leptosol distríco - Andosol mólico
- Lixisol háplico - Gleysol distríco
- Cambisol distríco - Lixisol háplico - Fluvisol distríco
- Luvisol crómico - Cambisol éutrico
- Regosol éutrico - Afloramiento lítico
- Regosol distríco - Afloramiento lítico
- Leptosol distríco - Cambisol distríco - Afloramiento lítico
- Regosol éutrico - Andosol mólico
- Leptosol distríco - Cambisol distríco - Regosol distríco
- Regosol éutrico - Calcisol háplico
- Leptosol distríco - Regosol distríco - Afloramiento lítico
- Regosol éutrico - Cambisol éutrico
- Leptosol lítico - Afloramiento lítico
- Solonchak háplico - Leptosol éutrico
- Leptosol éutrico - Afloramiento lítico

**MV-5. Mapa Clase de suelo FAO (Fuente: ONERN)**





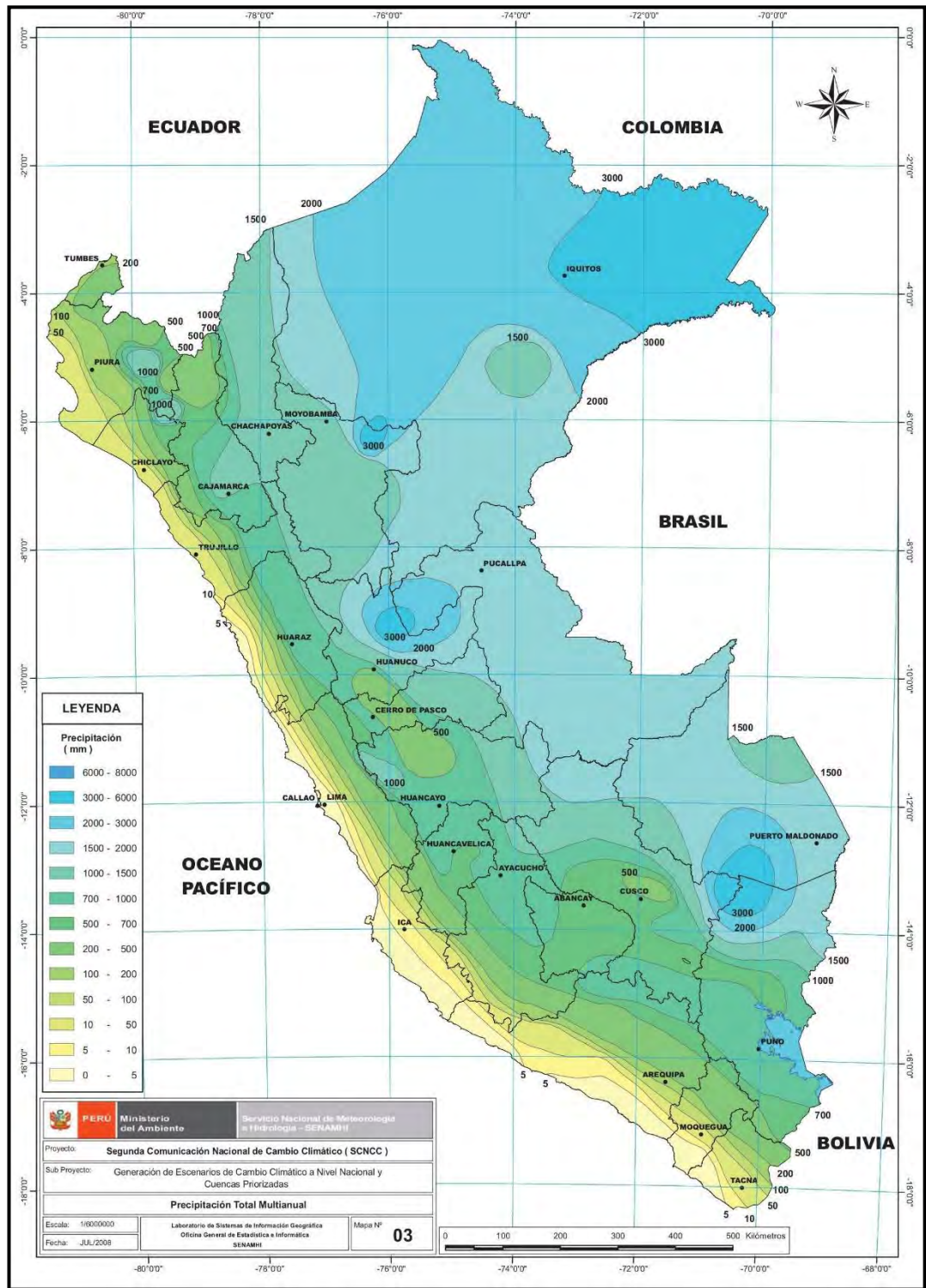
**MV-6.** Mapa nacional de la distribución de la geología (Fuente: INGEMMET)



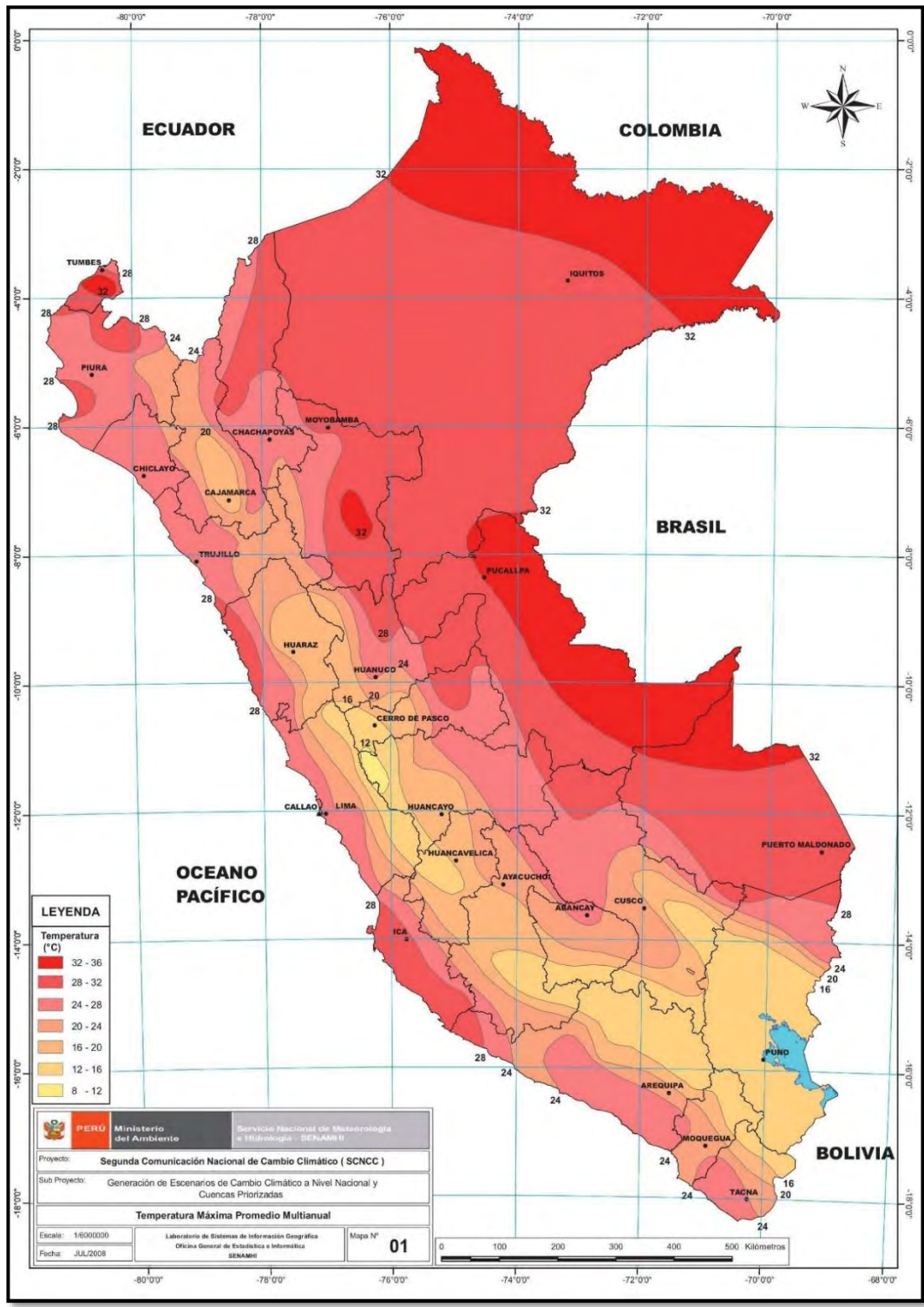
**MV-7.** Mapa base de la distribución geológica de Ayacucho (Fuente: MINEM)



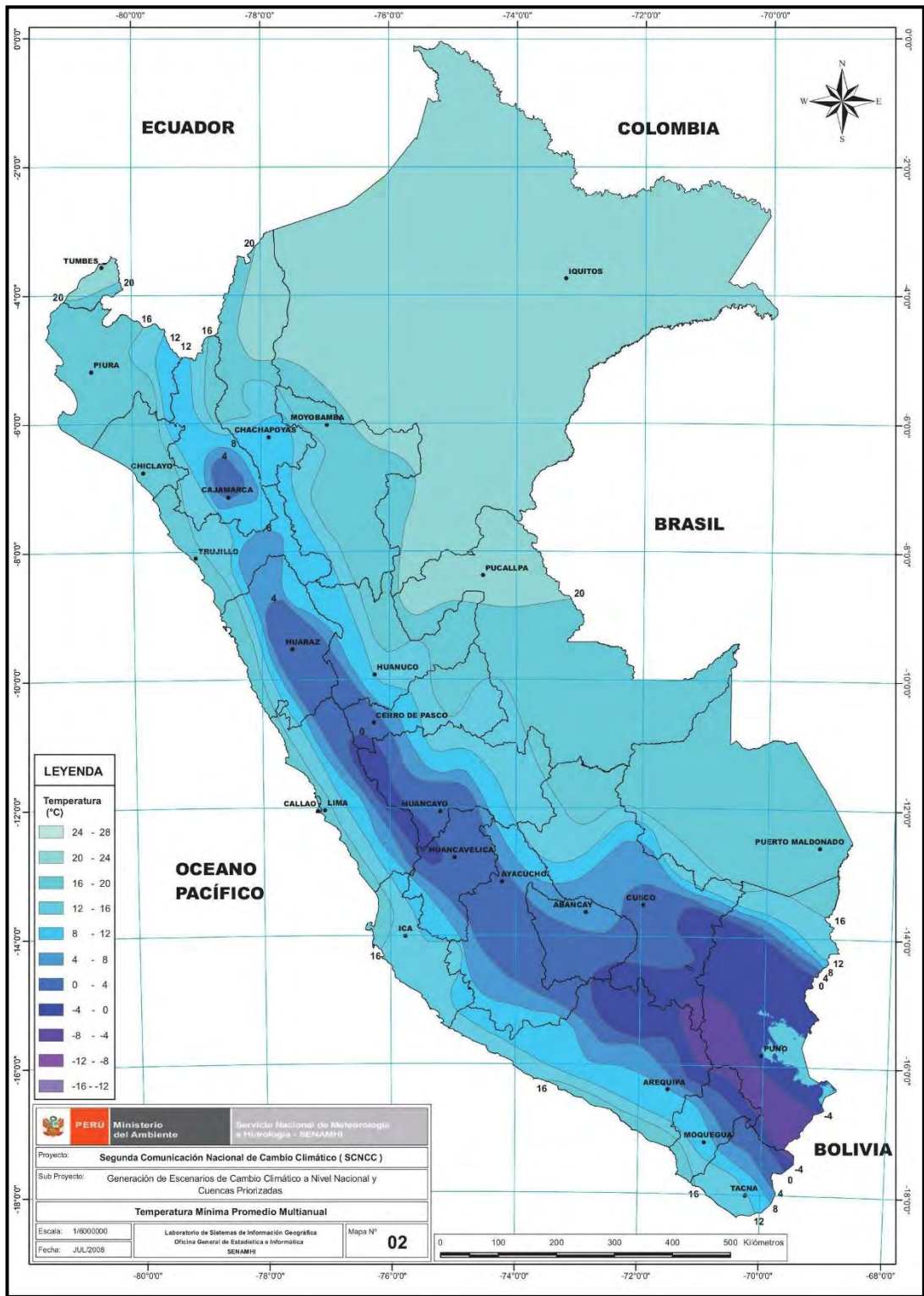
**MAPAS CLIMÁTICOS PROMEDIO  
MULTIANUALES 1965 -2006**



MA-1. Mapa de Precipitación Total Multianual (SENAMHI, 2010)

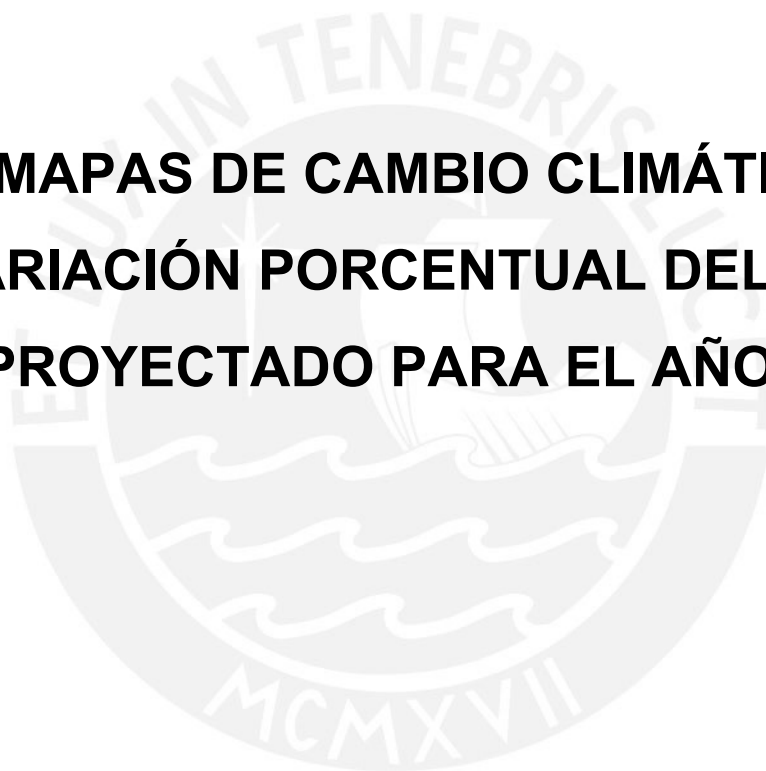


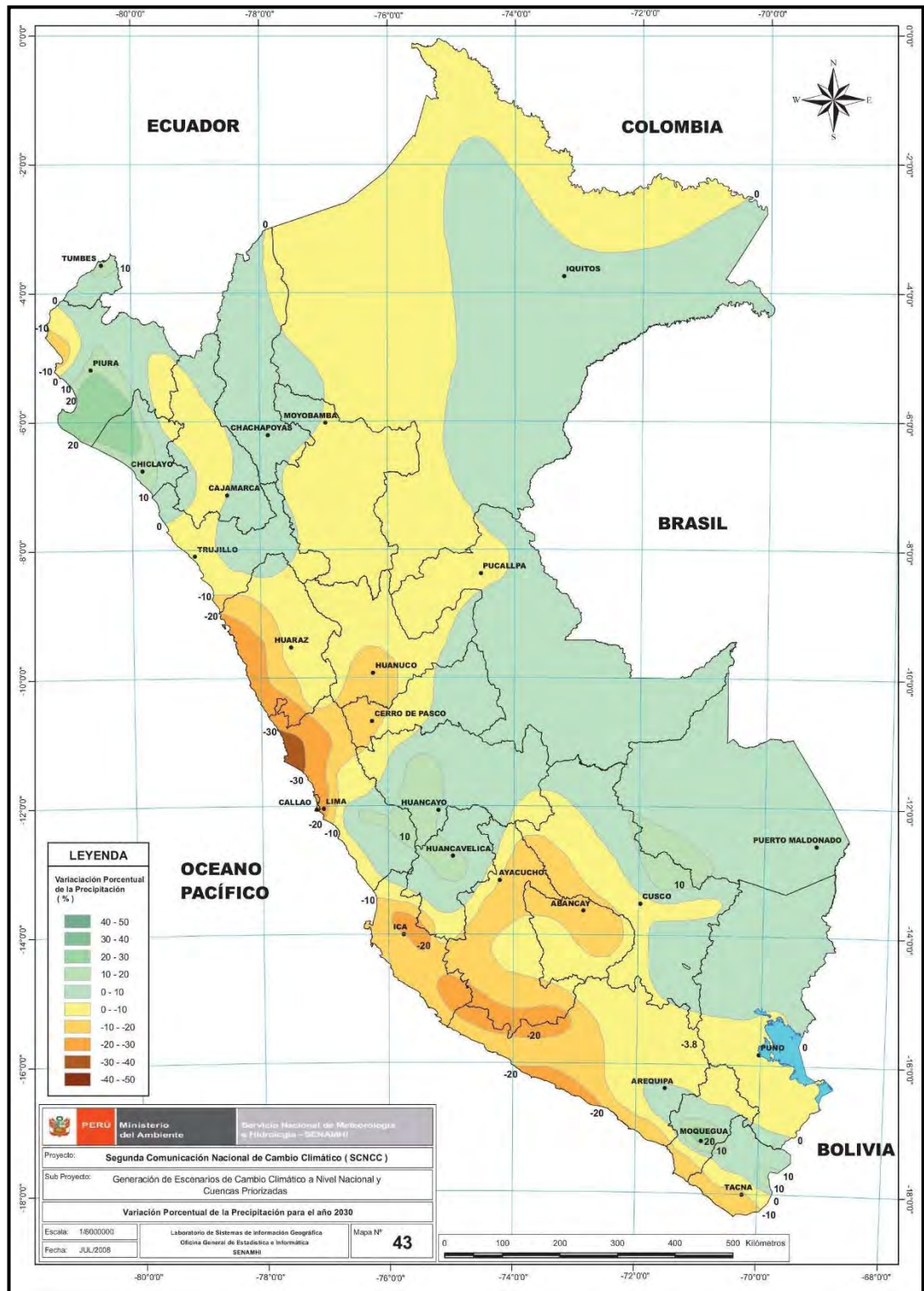
**MA-2.** Mapa de Temperatura Máxima Promedio Multianual (SENAMHI, 2010)



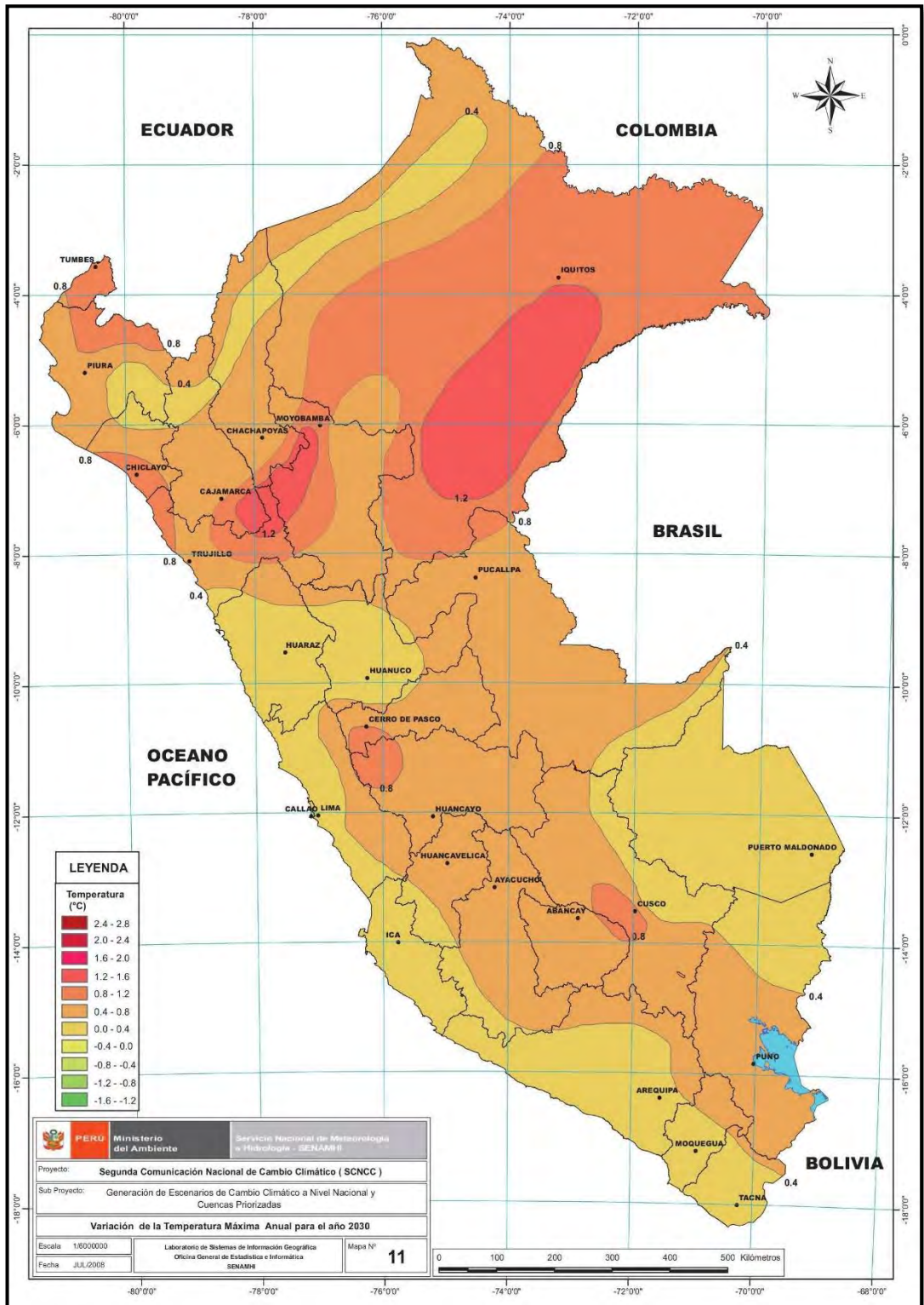
**MA-3.** Mapa de Temperatura Mínima Promedio Multianual (SENAMHI, 2010)

**MAPAS DE CAMBIO CLIMÁTICO –  
VARIACIÓN PORCENTUAL DEL CLIMA  
PROYECTADO PARA EL AÑO 2030**

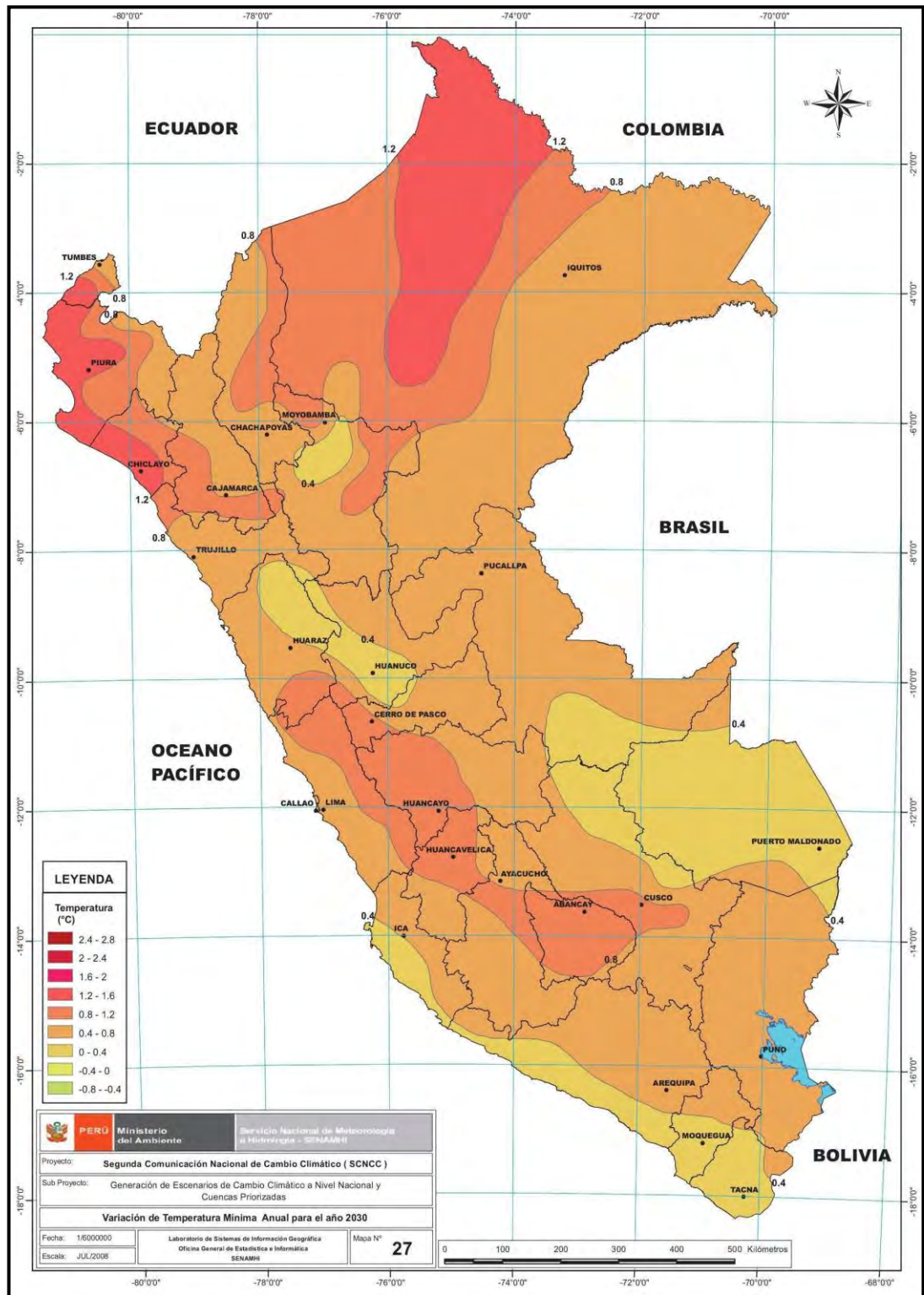




MC-1. Mapa de variación de la Precipitación para el año 2030 (SENAMHI, 2010)



**MC-2.** Mapa de variación de la Temperatura Máxima para el año 2030 (SENAMHI, 2010)



MC-3. Mapa de variación de la Temperatura Mínima para el año 2030 (SENAMHI, 2010)

# **ANEXO IV:**

## **MEMORIAS DE CÁLCULO**

- **Curva Hipsométrica**
- **Curva de Capacidad Bruta del Embalse**
- **Parametrización de la geometría del vaso**
- **Modelo de transformación de Témez**
- **Simulación de operación del reservorio**
- **Variación de niveles en el embalse –  
Déficits y Superávits**

## Curva Hipsométrica

Intervalo	Cota Media (msnm)	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)	A acum debajo (m <sup>2</sup> )	A acum debajo (%)	A acum sobre (m <sup>2</sup> )	A acum sobre (%)
	4413	0.00	0.00%	0.00	0.00%	<b>2690698.46</b>	<b>100.00%</b>
4413 - 4420	4417	55199.62	2.05%	55199.62	2.05%	2635498.84	97.95%
4420 - 4440	4430	130113.19	4.84%	185312.81	6.89%	2505385.65	93.11%
4440 - 4460	4450	180893.71	6.72%	366206.52	13.61%	2324491.94	86.39%
4460 - 4480	4470	141694.84	5.27%	507901.36	18.88%	2182797.10	81.12%
4480 - 4500	4490	181109.23	6.73%	689010.59	25.61%	2001687.87	74.39%
4500 - 4520	4510	261762.40	9.73%	950772.99	35.34%	1739925.47	64.66%
4520 - 4540	4530	357094.11	13.27%	1307867.10	48.61%	1382831.36	51.39%
4540 - 4560	4550	481091.59	17.88%	1788958.69	66.49%	901739.77	33.51%
4560 - 4580	4570	321113.69	11.93%	2110072.38	78.42%	580626.08	21.58%
4580 - 4600	4590	451049.23	16.76%	2561121.61	95.18%	129576.85	4.82%
4600 - 4620	4610	27307.72	1.01%	2588429.33	96.20%	102269.13	3.80%
4620 - 4640	4630	25288.78	0.94%	2613718.11	97.14%	76980.35	2.86%
4640 - 4660	4650	23448.07	0.87%	2637166.18	98.01%	53532.28	1.99%
4660 - 4680	4670	25012.94	0.93%	2662179.12	98.94%	28519.34	1.06%
4680 - 4700	4690	28519.34	1.06%	<b>2690698.46</b>	<b>100.00%</b>	0.00	0.00%

**2690698.46**

## Curva de Capacidad Bruta del Embalse

Cota (msnm)	Area Parcial (m <sup>2</sup> )	Área Total (m <sup>2</sup> )	Vol (m <sup>3</sup> )	Vol acum (m <sup>3</sup> )
4411	0	0	0.00	0.00
4412	42.25	42.25	21.13	21.13
4413	482.69	524.94	283.60	304.72
4414	3436.57	3961.51	2243.23	2547.95
4415	17770.44	21731.95	12846.73	15394.68
4416	4753.01	26484.96	24108.46	39503.13
4417	5809.1	32294.06	29389.51	68892.64
4418	4835.1	37129.16	34711.61	103604.25
4419	4861.17	41990.33	39559.75	143164.00
4420	6534.03	48524.36	45257.35	188421.34
4421	7172.29	55696.65	52110.51	240531.85
4422	13422.42	69119.07	62407.86	302939.71
4423	14645.61	83764.68	76441.88	379381.58

## Parametrización de la geometría del vaso

Del relevamiento de campo		Proceso para ajuste de la curva áreas-cotas					Valores según curvas ajustadas	
Cotas (msnm)	Áreas (Há)	Alturas h = (Hi-H*)	Raíz (Área)	H*i para mejor ajuste	Ln(Alturas)	Ln(Áreas)	Área (Há) = F <sub>1</sub> (Cota)	Vol (Hm <sup>3</sup> ) = F <sub>2</sub> (Cota)
4413	0.092	0.93	0.30	4412.33	-0.073	-2.388	0.163	0.001
4414	0.569	1.93	0.75	4412.48	0.658	-0.563	0.548	0.004
4415	2.178	2.93	1.48	4412.31	1.075	0.778	1.096	0.012
4416	2.646	3.93	1.63	4412.19	1.369	0.973	1.785	0.026
4417	3.229	4.93	1.80	4412.07	1.595	1.172	2.600	0.048
4418	3.713	5.93	1.93	4411.96	1.780	1.312	3.532	0.079
4419	4.199	6.93	2.05	4411.88	1.936	1.435	4.574	0.119
4420	4.852	7.93	2.20	4411.82	2.071	1.579	5.720	0.171
4421	5.570	8.93	2.36	4411.83	2.189	1.717	6.966	0.234
4422	6.912	9.93	2.63	4411.83	2.296	1.933	8.307	0.310
4423	8.376	10.93	2.89	0	2.392	2.125	9.741	0.400

**ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA DE APORTE**  
**MODELO PRECIPITACIÓN ESCURRIMIENTO (TEMEZ 1977)**

Área de cuenca Champaccocha: **Ac** 269 Ha

**PARÁMETROS FIJOS PARA EL MODELO DE TEMEZ**

Parámetro de proporcionalidad del Agua Disponible en el suelo:	<b>H<sub>max</sub></b>	147 mm
Parámetro de la precipitación mínima para que exista escurrimiento:	<b>Co</b>	0.3
Parámetro de descarga de infiltración máxima:	<b>Imax</b>	335 mm
Parámetros de descarga del almacenamiento subterráneo:	<b>α</b>	0.825 1/mes

Columna		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
<b>i</b>	<b>ETPi</b>	<b>Precip</b>	<b>δi</b>	<b>Poi</b>	<b>Ti</b>	<b>Hi</b>	<b>ETRi</b>	<b>li</b>	<b>Asupi</b>	<b>V</b>	<b>Asubi</b>	<b>A</b>	<b>Vol Esci</b>	
<b>Año</b>	<b>mes</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>Hm3</b>	
						0				0				
1982	9	101.5	142.2	248.54	44.10	31.79	8.83	101.54	29.03	2.75	19.22	9.81	12.57	0.03
1982	10	112.7	111.5	250.83	41.45	17.55	0.00	102.76	16.68	0.87	19.46	16.43	17.31	0.05
1982	11	108.1	127.3	255.07	44.10	23.55	0.00	103.79	22.00	1.55	23.10	18.37	19.92	0.05
1982	12	123.4	4.9	270.35	44.10	0.00	0.00	4.91	0.00	0.00	10.12	12.97	12.97	0.03
1983	1	119.9	173.8	266.93	44.10	47.74	6.16	119.93	41.78	5.95	32.10	19.81	25.76	0.07
1983	2	105.1	150.3	245.91	42.25	37.43	13.92	105.07	33.66	3.76	36.35	29.41	33.17	0.09
1983	3	108.0	123.9	241.05	39.92	24.74	5.12	107.97	23.04	1.70	31.18	28.21	29.91	0.08
1983	4	93.5	106.9	235.33	42.56	16.09	2.45	93.45	15.35	0.74	23.83	22.70	23.44	0.06
1983	5	89.6	24.5	234.11	43.36	0.00	0.00	26.92	0.00	0.00	10.44	13.38	13.38	0.04
1983	6	79.8	0.7	226.79	44.10	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	4.58	5.87	5.87	0.02
1983	7	86.7	0.2	233.66	44.10	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	2.01	2.57	2.57	0.01
1983	8	97.8	19.1	244.80	44.10	0.00	0.00	19.10	0.00	0.00	0.88	1.13	1.13	0.00
1983	9	104.3	96.4	251.31	44.10	10.52	0.00	85.83	10.20	0.32	7.14	3.94	4.26	0.011
1983	10	119.0	28.6	266.03	44.10	0.00	0.00	28.62	0.00	0.00	3.13	4.01	4.01	0.011
1983	11	120.5	22.4	267.48	44.10	0.00	0.00	22.43	0.00	0.00	1.37	1.76	1.76	0.005
1983	12	117.5	218.2	264.46	44.10	76.82	23.89	117.46	62.49	14.33	41.97	21.89	36.22	0.097
1984	1	106.1	110.6	229.16	36.93	20.40	8.01	106.05	19.22	1.17	31.12	30.07	31.25	0.084
1984	2	95.6	355.7	234.60	41.70	194.51	73.59	95.61	123.06	71.45	95.10	59.08	130.53	0.351
1984	3	99.4	299.4	172.80	22.02	179.69	93.90	99.39	116.96	62.73	119.10	92.96	155.69	0.419
1984	4	89.4	108.5	142.48	15.93	39.13	73.93	89.38	35.04	4.09	75.39	78.75	82.84	0.223
1984	5	86.0	7.1	159.02	21.92	0.00	0.00	80.99	0.00	0.00	33.04	42.35	42.35	0.114
1984	6	75.5	11.5	222.52	44.10	0.00	0.00	11.54	0.00	0.00	14.48	18.56	18.56	0.050
1984	7	84.4	9.3	231.38	44.10	0.00	0.00	9.30	0.00	0.00	6.35	8.13	8.13	0.022
1984	8	94.4	21.9	241.37	44.10	0.00	0.00	21.92	0.00	0.00	2.78	3.56	3.56	0.010
1984	9	104.3	1.1	251.29	44.10	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00	1.22	1.56	1.56	0.004
1984	10	112.1	36.7	259.07	44.10	0.00	0.00	36.71	0.00	0.00	0.53	0.68	0.68	0.002
1984	11	112.8	174.6	259.80	44.10	49.20	12.61	112.80	42.90	6.30	28.63	14.80	21.10	0.057
1984	12	113.3	207.5	247.66	40.32	74.61	32.21	113.27	61.02	13.59	52.94	36.71	50.30	0.135
1985	1	111.6	58.7	226.41	34.44	2.73	0.00	88.21	2.71	0.02	24.99	30.66	30.68	0.083
1985	2	94.8	125.4	241.83	44.10	23.70	6.89	94.83	22.13	1.57	25.60	21.52	23.09	0.062
1985	3	102.2	120.5	242.34	42.03	22.10	3.09	102.23	20.73	1.37	24.94	21.39	22.76	0.061
1985	4	90.0	130.6	233.93	43.17	27.48	16.19	90.02	25.39	2.08	27.74	22.60	24.68	0.066
1985	5	84.8	41.9	215.56	39.24	0.04	0.00	58.08	0.04	0.00	12.18	15.60	15.60	0.042
1985	6	73.8	6.4	220.81	44.10	0.00	0.00	6.44	0.00	0.00	5.34	6.84	6.84	0.018
1985	7	81.6	1.9	228.64	44.10	0.00	0.00	1.87	0.00	0.00	2.34	3.00	3.00	0.008
1985	8	95.2	26.7	242.16	44.10	0.00	0.00	26.66	0.00	0.00	1.03	1.31	1.31	0.004
1985	9	100.9	88.7	247.91	44.10	8.01	0.00	80.70	7.82	0.19	5.63	3.22	3.41	0.009
1985	10	117.4	3.7	264.41	44.10	0.00	0.00	3.66	0.00	0.00	2.47	3.16	3.16	0.009
1985	11	114.7	27.4	261.65	44.10	0.00	0.00	27.37	0.00	0.00	1.08	1.39	1.39	0.004
1985	12	114.6	152.4	261.57	44.10	36.01	1.83	114.57	32.51	3.49	22.00	11.60	15.09	0.041
1986	1	106.7	289.3	251.84	43.55	133.01	51.45	106.67	95.21	37.80	72.67	44.54	82.34	0.222
1986	2	94.5	312.7	190.01	28.67	181.17	88.56	94.46	117.58	63.59	109.68	80.57	144.16	0.388
1986	3	98.9	168.1	157.38	17.53	78.09	79.66	98.94	63.33	14.76	89.99	83.02	97.79	0.263
1986	4	90.6	60.6	157.94	20.20	9.15	40.48	90.60	8.90	0.24	45.33	53.56	53.81	0.145
1986	5	84.4	53.3	190.90	31.96	2.52	6.86	84.38	2.50	0.02	21.52	26.31	26.33	0.071
1986	6	80.2	3.9	220.37	42.04	0.00	0.00	10.79	0.00	0.00	9.43	12.09	12.09	0.033
1986	7	82.1	4.8	229.08	44.10	0.00	0.00	4.80	0.00	0.00	4.13	5.30	5.30	0.014
1986	8	92.2	13.0	239.16	44.10	0.00	0.00	12.99	0.00	0.00	1.81	2.32	2.32	0.006
1986	9	100.8	89.8	247.84	44.10	8.37	0.00	81.43	8.17	0.20	6.20	3.78	3.98	0.011
1986	10	117.7	49.0	264.69	44.10	0.11	0.00	48.90	0.11	0.00	2.79	3.52	3.52	0.009
1986	11	115.5	4.5	262.49	44.10	0.00	0.00	4.50	0.00	0.00	1.22	1.57	1.57	0.004

i	ETPi	Precip	δi	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci	
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3	
1986	12	116.8	44.9	263.79	44.10	0.00	0.00	44.85	0.00	0.00	0.54	0.69	0.69	0.002
1987	1	111.4	231.0	258.43	44.10	87.05	32.51	111.43	69.10	17.96	45.98	23.66	41.61	0.112
1987	2	97.8	249.3	212.31	34.35	117.61	66.40	97.82	87.05	30.56	77.77	55.25	85.81	0.231
1987	3	102.7	56.8	183.28	24.18	5.56	14.99	102.68	5.47	0.09	37.71	45.54	45.63	0.123
1987	4	91.1	76.1	223.09	39.60	6.06	0.00	85.06	5.96	0.11	20.47	23.20	23.30	0.063
1987	5	89.0	13.9	235.96	44.10	0.00	0.00	13.91	0.00	0.00	8.97	11.50	11.50	0.031
1987	6	80.8	8.6	227.82	44.10	0.00	0.00	8.64	0.00	0.00	3.93	5.04	5.04	0.014
1987	7	84.2	15.5	231.24	44.10	0.00	0.00	15.53	0.00	0.00	1.72	2.21	2.21	0.006
1987	8	97.1	14.7	244.07	44.10	0.00	0.00	14.68	0.00	0.00	0.75	0.97	0.97	0.003
1987	9	106.7	0.3	253.67	44.10	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.33	0.42	0.42	0.001
1987	10	119.0	63.0	265.95	44.10	1.49	0.00	61.53	1.48	0.01	1.12	0.69	0.69	0.002
1987	11	115.7	65.3	262.74	44.10	1.87	0.00	63.40	1.86	0.01	1.72	1.26	1.27	0.003
1987	12	123.1	2.7	270.14	44.10	0.00	0.00	2.73	0.00	0.00	0.76	0.97	0.97	0.003
1988	1	113.3	193.2	260.29	44.10	60.86	19.06	113.29	51.51	9.36	34.43	17.83	27.19	0.073
1988	2	104.6	294.1	232.53	38.38	145.38	63.22	104.59	101.38	44.00	82.20	53.61	97.61	0.263
1988	3	105.2	88.5	188.97	25.14	17.68	28.86	105.19	16.79	0.89	47.14	51.86	52.74	0.142
1988	4	89.9	61.8	208.01	35.44	3.48	0.00	87.13	3.44	0.04	22.94	27.65	27.68	0.074
1988	5	85.9	34.9	232.86	44.10	0.00	0.00	34.88	0.00	0.00	10.05	12.89	12.89	0.035
1988	6	78.6	9.7	225.58	44.10	0.00	0.00	9.65	0.00	0.00	4.41	5.65	5.65	0.015
1988	7	84.4	4.0	231.44	44.10	0.00	0.00	4.04	0.00	0.00	1.93	2.47	2.47	0.007
1988	8	99.8	9.2	246.75	44.10	0.00	0.00	9.20	0.00	0.00	0.85	1.08	1.08	0.003
1988	9	106.8	58.6	253.82	44.10	0.94	0.00	57.68	0.94	0.00	0.99	0.79	0.79	0.002
1988	10	121.9	37.0	268.91	44.10	0.00	0.00	37.04	0.00	0.00	0.43	0.56	0.56	0.001
1988	11	124.4	48.8	271.40	44.10	0.09	0.00	48.70	0.09	0.00	0.25	0.28	0.28	0.001
1988	12	117.7	120.6	264.73	44.10	19.70	0.00	100.91	18.61	1.09	12.43	6.43	7.53	0.020
1989	1	107.0	172.0	254.02	44.10	48.44	16.56	107.02	42.32	6.12	33.46	21.29	27.40	0.074
1989	2	96.5	134.3	226.93	39.13	32.03	22.38	96.49	29.23	2.79	34.01	28.68	31.47	0.085
1989	3	99.4	235.4	223.97	37.39	101.95	56.48	99.35	78.16	23.79	66.65	45.53	69.31	0.186
1989	4	88.1	112.5	178.65	27.16	30.75	50.10	88.13	28.17	2.59	47.85	46.96	49.55	0.133
1989	5	85.0	18.8	181.91	29.07	0.00	0.00	68.91	0.00	0.00	20.97	26.88	26.88	0.072
1989	6	75.1	3.5	222.05	44.10	0.00	0.00	3.52	0.00	0.00	9.19	11.78	11.78	0.032
1989	7	80.0	0.4	227.04	44.10	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	4.03	5.16	5.16	0.014
1989	8	90.4	27.2	237.44	44.10	0.00	0.00	27.22	0.00	0.00	1.77	2.26	2.26	0.006
1989	9	104.8	40.9	251.84	44.10	0.00	0.00	40.88	0.00	0.00	0.77	0.99	0.99	0.003
1989	10	112.0	30.2	259.00	44.10	0.00	0.00	30.16	0.00	0.00	0.34	0.43	0.43	0.001
1989	11	122.5	37.4	269.50	44.10	0.00	0.00	37.38	0.00	0.00	0.15	0.19	0.19	0.001
1989	12	128.0	6.4	274.98	44.10	0.00	0.00	6.40	0.00	0.00	0.07	0.08	0.08	0.000
1990	1	112.7	186.4	259.74	44.10	56.54	17.07	112.74	48.38	8.16	32.05	16.39	24.55	0.066
1990	2	103.4	117.3	233.28	38.98	22.48	8.49	103.35	21.06	1.41	27.99	25.13	26.54	0.071
1990	3	106.1	113.8	244.57	41.55	18.95	0.00	103.32	17.94	1.01	24.14	21.79	22.80	0.061
1990	4	94.6	78.0	241.57	44.10	4.97	0.00	73.03	4.89	0.07	13.82	15.22	15.29	0.041
1990	5	85.6	34.5	232.59	44.10	0.00	0.00	34.51	0.00	0.00	6.06	7.76	7.76	0.021
1990	6	72.3	26.3	219.31	44.10	0.00	0.00	26.34	0.00	0.00	2.65	3.40	3.40	0.009
1990	7	81.5	2.7	228.47	44.10	0.00	0.00	2.69	0.00	0.00	1.16	1.49	1.49	0.004
1990	8	92.5	27.6	239.51	44.10	0.00	0.00	27.59	0.00	0.00	0.51	0.65	0.65	0.002
1990	9	101.2	77.0	248.24	44.10	4.58	0.00	72.46	4.52	0.06	3.21	1.81	1.87	0.005
1990	10	112.3	91.2	259.33	44.10	8.47	0.00	82.77	8.26	0.21	6.88	4.60	4.81	0.013
1990	11	109.6	190.4	256.64	44.10	59.63	21.10	109.64	50.62	9.01	36.52	20.97	29.98	0.081
1990	12	113.5	130.5	239.44	37.77	29.19	8.84	113.54	26.85	2.34	33.78	29.59	31.93	0.086
1991	1	115.6	197.9	253.72	41.45	66.38	24.79	115.56	55.40	10.98	51.48	37.70	48.68	0.131
1991	2	97.4	228.4	219.65	36.66	98.11	57.64	97.44	75.88	22.22	72.79	54.57	76.79	0.207
1991	3	100.2	110.6	189.60	26.81	28.49	39.54	100.24	26.25	2.23	49.28	49.77	52.00	0.140
1991	4	89.3	20.4	196.76	32.24	0.00	0.00	59.97	0.00	0.00	21.60	27.68	27.68	0.074
1991	5	86.2	42.1	233.19	44.10	0.00	0.00	42.06	0.00	0.00	9.46	12.13	12.13	0.033
1991	6	80.6	7.1	227.64	44.10	0.00	0.00	7.14	0.00	0.00	4.15	5.32	5.32	0.014
1991	7	86.4	0.0	233.39	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.82	2.33	2.33	0.006
1991	8	97.1	0.0	244.07	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	1.02	1.02	0.003
1991	9	103.8	65.8	250.76	44.10	2.07	0.00	63.77	2.06	0.01	1.71	1.14	1.16	0.003
1991	10	115.3	57.9	262.32	44.10	0.82	0.00	57.03	0.81	0.00	1.29	1.24	1.24	0.003
1991	11	118.2	9.4	265.15	44.10	0.00	0.00	9.35	0.00	0.00	0.56	0.72	0.72	0.002
1991	12	125.6	3.4	272.56	44.10	0.00	0.00	3.37	0.00	0.00	0.25	0.32	0.32	0.001
1992	1	116.4	131.1	263.39	44.10	24.69	0.00	106.37	23.00	1.70	15.33	7.91	9.61	0.026
1992	2	103.1	255.4	250.07	44.10	107.01	45.33	103.07	81.10	25.91	60.41	36.03	61.93	0.167
1992	3	105.4	117.1	207.04	30.50	28.50	28.56	105.37	26.27	2.23	43.86	42.81	45.05	0.121
1992	4	91.1	82.7	209.54	35.53	10.04	10.07	91.10	9.75	0.29	25.67	27.93	28.23	0.076
1992	5	91.5	2.0	228.46	41.08	0.00	0.00	12.07	0.00	0.00	11.25	14.42	14.42	0.039

i	ETPi	Precip	δi	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci	
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3	
1992	6	78.7	6.4	225.69	44.10	0.00	0.00	6.36	0.00	0.00	4.93	6.32	6.32	0.017
1992	7	83.9	3.3	230.93	44.10	0.00	0.00	3.34	0.00	0.00	2.16	2.77	2.77	0.007
1992	8	92.9	17.8	239.93	44.10	0.00	0.00	17.79	0.00	0.00	0.95	1.21	1.21	0.003
1992	9	104.3	1.7	251.32	44.10	0.00	0.00	1.69	0.00	0.00	0.41	0.53	0.53	0.001
1992	10	115.0	70.1	261.95	44.10	2.77	0.00	67.30	2.74	0.02	2.00	1.16	1.18	0.003
1992	11	120.8	90.0	267.78	44.10	7.83	0.00	82.21	7.65	0.18	5.94	3.71	3.89	0.010
1992	12	123.7	91.8	270.65	44.10	8.31	0.00	83.52	8.10	0.20	7.97	6.08	6.28	0.017
1993	1	116.5	365.5	263.50	44.10	190.97	57.98	116.50	121.63	69.34	84.01	45.59	114.92	0.309
1993	2	100.4	244.6	189.39	26.71	124.74	77.46	100.37	90.89	33.84	96.99	77.92	111.76	0.301
1993	3	104.3	261.8	173.79	20.86	147.36	87.62	104.25	102.34	45.02	110.25	89.08	134.09	0.361
1993	4	90.6	196.8	150.02	17.82	102.98	90.84	90.64	78.76	24.21	100.46	88.56	112.77	0.303
1993	5	87.9	1.0	144.01	16.85	0.00	4.03	87.85	0.00	0.00	44.02	56.43	56.43	0.152
1993	6	78.8	1.8	221.77	42.89	0.00	0.00	5.87	0.00	0.00	19.29	24.73	24.73	0.067
1993	7	83.6	6.5	230.55	44.10	0.00	0.00	6.48	0.00	0.00	8.45	10.84	10.84	0.029
1993	8	90.5	15.2	237.48	44.10	0.00	0.00	15.16	0.00	0.00	3.71	4.75	4.75	0.013
1993	9	100.3	108.3	247.31	44.10	15.42	0.00	92.89	14.74	0.68	11.38	7.06	7.74	0.021
1993	10	115.4	137.4	262.36	44.10	27.91	0.00	109.44	25.77	2.15	22.05	15.10	17.25	0.046
1993	11	113.4	97.0	260.39	44.10	10.39	0.00	86.60	10.08	0.31	16.33	15.79	16.10	0.043
1993	12	114.3	258.2	261.30	44.10	106.31	37.63	114.30	80.70	25.61	60.58	36.45	62.06	0.167
1994	1	114.4	181.7	223.74	32.81	65.20	39.71	114.37	54.58	10.62	62.68	52.48	63.10	0.170
1994	2	102.0	291.2	209.26	32.19	153.80	75.09	101.97	105.41	48.39	97.25	70.84	119.23	0.321
1994	3	106.9	134.2	178.80	21.57	46.99	55.39	106.89	41.21	5.78	69.90	68.56	74.34	0.200
1994	4	90.9	85.8	182.46	27.48	15.96	34.41	90.85	15.24	0.73	40.72	44.42	45.14	0.121
1994	5	88.8	23.4	201.43	33.78	0.00	0.00	57.85	0.00	0.00	17.84	22.87	22.87	0.062
1994	6	80.1	1.0	227.14	44.10	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	7.82	10.02	10.02	0.027
1994	7	86.5	15.9	233.54	44.10	0.00	0.00	15.85	0.00	0.00	3.43	4.39	4.39	0.012
1994	8	98.5	15.6	245.50	44.10	0.00	0.00	15.59	0.00	0.00	1.50	1.93	1.93	0.005
1994	9	104.3	129.0	251.32	44.10	24.67	0.00	104.32	22.98	1.69	15.87	8.61	10.30	0.028
1994	10	122.5	43.7	269.52	44.10	0.00	0.00	43.67	0.00	0.00	6.95	8.91	8.91	0.024
1994	11	120.4	147.6	267.43	44.10	32.79	0.00	114.84	29.87	2.92	22.82	14.00	16.93	0.046
1994	12	124.0	73.5	271.03	44.10	3.37	0.00	70.14	3.34	0.03	12.21	13.95	13.98	0.038
1995	1	119.8	181.2	266.78	44.10	52.21	9.16	119.78	45.17	7.04	35.26	22.13	29.17	0.078
1995	2	105.2	240.6	242.99	41.35	99.02	45.58	105.15	76.43	22.59	66.05	45.64	68.23	0.184
1995	3	107.2	273.0	208.58	30.43	139.83	71.55	107.16	98.65	41.18	94.25	70.45	111.63	0.300
1995	4	100.7	88.0	176.18	22.63	19.51	39.30	100.73	18.43	1.07	53.51	59.18	60.25	0.162
1995	5	91.2	14.1	198.88	32.31	0.00	0.00	53.37	0.00	0.00	23.45	30.06	30.06	0.081
1995	6	80.5	2.7	227.46	44.10	0.00	0.00	2.69	0.00	0.00	10.28	13.17	13.17	0.035
1995	7	87.5	0.0	234.46	44.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	4.50	5.77	5.77	0.016
1995	8	104.7	1.3	251.68	44.10	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00	1.97	2.53	2.53	0.007
1995	9	104.7	14.3	251.70	44.10	0.00	0.00	14.25	0.00	0.00	0.86	1.11	1.11	0.003
1995	10	123.9	48.9	270.94	44.10	0.10	0.00	48.82	0.10	0.00	0.45	0.52	0.52	0.001
1995	11	117.6	92.8	264.55	44.10	8.80	0.00	83.95	8.57	0.23	5.87	3.15	3.37	0.009
1995	12	123.1	76.0	270.09	44.10	3.95	0.00	72.06	3.90	0.05	5.16	4.62	4.66	0.013
1996	1	116.4	274.8	263.40	44.10	118.28	40.13	116.40	87.42	30.86	60.13	32.44	63.31	0.170
1996	2	107.7	305.4	214.58	32.06	163.87	73.92	107.71	110.04	53.83	99.20	70.97	124.80	0.336
1996	3	107.0	148.0	180.09	21.92	55.89	58.97	107.01	47.90	7.99	75.18	71.91	79.90	0.215
1996	4	92.2	62.8	180.21	26.41	6.95	22.61	92.18	6.81	0.14	37.45	44.53	44.68	0.120
1996	5	89.3	8.2	213.72	37.32	0.00	0.00	30.80	0.00	0.00	16.41	21.04	21.04	0.057
1996	6	81.0	0.0	228.01	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.19	9.22	9.22	0.025
1996	7	86.1	0.2	233.08	44.10	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	3.15	4.04	4.04	0.011
1996	8	96.7	12.3	243.69	44.10	0.00	0.00	12.28	0.00	0.00	1.38	1.77	1.77	0.005
1996	9	106.1	32.0	253.05	44.10	0.00	0.00	31.99	0.00	0.00	0.61	0.78	0.78	0.002
1996	10	122.8	26.8	269.75	44.10	0.00	0.00	26.80	0.00	0.00	0.27	0.34	0.34	0.001
1996	11	122.7	94.6	269.73	44.10	9.23	0.00	85.34	8.98	0.25	6.06	3.18	3.43	0.009
1996	12	120.6	128.4	267.59	44.10	23.10	0.00	105.32	21.61	1.49	16.96	10.71	12.20	0.033
1997	1	115.3	232.4	262.30	44.10	87.22	29.87	115.30	69.20	18.02	53.24	32.92	50.93	0.137
1997	2	103.1	152.5	220.19	35.14	45.57	33.78	103.06	40.11	5.46	49.89	43.47	48.92	0.132
1997	3	111.4	190.0	224.60	33.97	70.19	42.15	111.38	58.03	12.16	60.28	47.64	59.80	0.161
1997	4	100.8	11.4	205.67	31.45	0.00	0.00	53.56	0.00	0.00	26.42	33.86	33.86	0.091
1997	5	90.5	26.2	237.45	44.10	0.00	0.00	26.15	0.00	0.00	11.58	14.84	14.84	0.040
1997	6	83.4	2.1	230.36	44.10	0.00	0.00	2.14	0.00	0.00	5.07	6.50	6.50	0.017
1997	7	86.3	7.1	233.27	44.10	0.00	0.00	7.08	0.00	0.00	2.22	2.85	2.85	0.008
1997	8	92.2	43.8	239.23	44.10	0.00	0.00	43.84	0.00	0.00	0.97	1.25	1.25	0.003
1997	9	105.3	61.0	252.30	44.10	1.27	0.00	59.73	1.26	0.00	1.26	0.97	0.98	0.003
1997	10	123.0	85.9	269.95	44.10	6.51	0.00	79.34	6.39	0.12	4.78	2.87	2.99	0.008
1997	11	117.7	87.1	264.67	44.10	7.03	0.00	80.11	6.88	0.14	6.65	5.01	5.16	0.014

i	ETPi	Precip	δi	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci	
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3	
1997	12	121.3	126.3	268.27	44.10	22.05	0.00	104.25	20.69	1.36	16.61	10.73	12.09	0.033
1998	1	112.2	197.0	259.21	44.10	63.55	21.27	112.21	53.41	10.13	42.64	27.39	37.52	0.101
1998	2	96.4	195.3	222.17	37.72	72.59	47.53	96.44	59.67	12.93	58.18	44.12	57.05	0.153
1998	3	104.3	126.7	203.81	29.84	34.62	35.24	104.34	31.38	3.24	46.27	43.29	46.54	0.125
1998	4	93.9	42.1	205.67	33.53	0.41	0.00	76.92	0.41	0.00	20.55	26.13	26.13	0.070
1998	5	92.2	1.6	239.16	44.10	0.00	0.00	1.64	0.00	0.00	9.00	11.54	11.54	0.031
1998	6	78.1	9.2	225.06	44.10	0.00	0.00	9.20	0.00	0.00	3.95	5.06	5.06	0.014
1998	7	85.2	3.0	232.18	44.10	0.00	0.00	3.03	0.00	0.00	1.73	2.22	2.22	0.006
1998	8	97.7	0.2	244.72	44.10	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.76	0.97	0.97	0.003
1998	9	110.0	11.6	256.97	44.10	0.00	0.00	11.58	0.00	0.00	0.33	0.43	0.43	0.001
1998	10	119.8	22.4	266.79	44.10	0.00	0.00	22.37	0.00	0.00	0.15	0.19	0.19	0.001
1998	11	123.7	40.6	270.67	44.10	0.00	0.00	40.59	0.00	0.00	0.06	0.08	0.08	0.000
1998	12	117.6	6.3	264.57	44.10	0.00	0.00	6.28	0.00	0.00	0.03	0.04	0.04	0.000
1999	1	114.0	84.8	261.01	44.10	6.42	0.00	78.36	6.30	0.12	4.19	2.15	2.27	0.006
1999	2	95.7	345.8	242.72	44.10	181.95	68.16	95.72	117.91	64.04	79.89	42.21	106.25	0.286
1999	3	103.6	214.0	182.43	23.65	103.80	74.79	103.59	79.25	24.56	87.47	71.67	96.22	0.259
1999	4	91.4	141.0	163.60	21.66	54.49	69.89	91.39	46.87	7.62	69.36	64.98	72.61	0.195
1999	5	86.4	54.7	163.52	23.13	5.79	32.38	86.41	5.70	0.10	34.17	40.89	40.99	0.110
1999	6	81.1	7.3	195.74	34.38	0.00	0.00	39.67	0.00	0.00	14.97	19.19	19.19	0.052
1999	7	83.9	0.0	230.89	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.56	8.41	8.41	0.023
1999	8	99.1	14.3	246.13	44.10	0.00	0.00	14.25	0.00	0.00	2.88	3.69	3.69	0.010
1999	9	101.9	22.5	248.89	44.10	0.00	0.00	22.46	0.00	0.00	1.26	1.62	1.62	0.004
1999	10	112.3	99.7	259.27	44.10	11.42	0.00	88.29	11.04	0.38	7.86	4.44	4.82	0.013
1999	11	121.6	79.1	268.63	44.10	4.71	0.00	74.34	4.64	0.07	6.52	5.99	6.05	0.016
1999	12	116.7	258.7	263.73	44.10	106.03	35.90	116.73	80.54	25.49	56.17	30.88	56.37	0.152
2000	1	110.9	271.3	221.96	33.33	132.75	63.59	110.86	95.07	37.67	87.55	63.69	101.37	0.273
2000	2	102.6	387.0	186.04	25.02	250.57	97.43	102.63	143.35	107.22	133.27	97.64	204.86	0.551
2000	3	102.6	265.3	152.21	14.87	161.75	98.36	102.64	109.08	52.67	130.61	111.73	164.40	0.442
2000	4	90.9	27.4	139.52	14.59	1.19	33.67	90.88	1.18	0.00	58.02	73.77	73.78	0.198
2000	5	86.9	24.1	200.22	34.00	0.00	0.00	57.72	0.00	0.00	25.43	32.59	32.59	0.088
2000	6	78.5	1.1	225.54	44.10	0.00	0.00	1.12	0.00	0.00	11.14	14.28	14.28	0.038
2000	7	82.7	2.7	229.67	44.10	0.00	0.00	2.74	0.00	0.00	4.88	6.26	6.26	0.017
2000	8	92.8	6.7	239.80	44.10	0.00	0.00	6.71	0.00	0.00	2.14	2.74	2.74	0.007
2000	9	107.0	55.6	253.95	44.10	0.60	0.00	55.02	0.60	0.00	1.33	1.40	1.41	0.004
2000	10	112.8	152.1	259.82	44.10	36.05	3.26	112.82	32.55	3.50	22.13	11.75	15.25	0.041
2000	11	126.7	57.4	270.45	43.12	0.84	0.00	59.77	0.84	0.00	10.25	12.71	12.72	0.034
2000	12	119.6	129.9	266.55	44.10	23.87	0.00	106.00	22.28	1.59	19.24	13.29	14.88	0.040
2001	1	113.3	204.9	260.30	44.10	68.57	23.00	113.30	56.92	11.65	46.11	30.05	41.70	0.112
2001	2	103.5	117.1	227.51	37.20	23.64	12.98	103.51	22.08	1.56	34.83	33.37	34.93	0.094
2001	3	107.0	174.6	240.98	40.21	53.91	26.74	106.96	46.44	7.47	46.00	35.26	42.73	0.115
2001	4	94.9	7.0	215.18	36.08	0.00	0.00	33.72	0.00	0.00	20.16	25.84	25.84	0.070
2001	5	87.6	10.4	234.59	44.10	0.00	0.00	10.35	0.00	0.00	8.83	11.33	11.33	0.030
2001	6	76.5	5.2	223.53	44.10	0.00	0.00	5.15	0.00	0.00	3.87	4.96	4.96	0.013
2001	7	81.8	7.5	228.76	44.10	0.00	0.00	7.50	0.00	0.00	1.70	2.17	2.17	0.006
2001	8	93.0	23.2	239.97	44.10	0.00	0.00	23.19	0.00	0.00	0.74	0.95	0.95	0.003
2001	9	101.9	72.9	248.94	44.10	3.55	0.00	69.36	3.52	0.04	2.65	1.61	1.64	0.004
2001	10	116.8	85.2	263.78	44.10	6.48	0.00	78.72	6.35	0.12	5.37	3.64	3.76	0.010
2001	11	118.7	76.5	265.71	44.10	4.12	0.00	72.33	4.07	0.05	5.05	4.39	4.44	0.012
2001	12	122.3	124.0	269.34	44.10	20.90	0.00	103.05	19.67	1.23	15.23	9.48	10.71	0.029
2002	1	119.6	59.0	266.55	44.10	0.93	0.00	58.06	0.93	0.00	7.29	8.87	8.88	0.024
2002	2	100.0	282.8	246.95	44.10	129.02	53.80	99.95	93.14	35.87	64.86	35.58	71.45	0.192
2002	3	104.6	203.7	197.77	27.96	89.37	63.55	104.57	70.55	18.82	75.13	60.28	79.10	0.213
2002	4	94.6	98.1	178.05	25.03	23.59	43.42	94.60	22.04	1.55	47.51	49.65	51.21	0.138
2002	5	87.9	53.2	191.52	31.07	2.68	6.01	87.94	2.66	0.02	22.58	27.59	27.61	0.074
2002	6	78.2	6.5	219.23	42.30	0.00	0.00	12.49	0.00	0.00	9.90	12.69	12.69	0.034
2002	7	82.3	24.9	229.33	44.10	0.00	0.00	24.85	0.00	0.00	4.34	5.56	5.56	0.015
2002	8	93.1	5.9	240.10	44.10	0.00	0.00	5.90	0.00	0.00	1.90	2.44	2.44	0.007
2002	9	100.2	68.4	247.16	44.10	2.60	0.00	65.79	2.58	0.02	2.54	1.94	1.96	0.005
2002	10	116.3	30.5	263.32	44.10	0.00	0.00	30.47	0.00	0.00	1.11	1.43	1.43	0.004
2002	11	115.9	74.9	262.86	44.10	3.79	0.00	71.06	3.75	0.04	2.97	1.89	1.93	0.005
2002	12	122.3	83.5	269.31	44.10	5.86	0.00	77.60	5.75	0.10	5.11	3.61	3.71	0.010
2003	1	118.5	137.4	265.45	44.10	27.67	0.00	109.73	25.55	2.11	19.16	11.51	13.62	0.037
2003	2	102.3	261.5	249.31	44.10	111.84	47.35	102.31	83.84	27.99	63.90	39.10	67.09	0.180
2003	3	106.5	222.4	206.12	29.89	100.47	62.77	106.47	77.29	23.18	79.17	62.02	85.20	0.229
2003	4	97.2	75.0	181.42	25.27	12.02	28.57	97.19	11.60	0.42	42.37	48.39	48.81	0.131
2003	5	88.5	1.1	206.94	35.53	0.00	0.00	29.63	0.00	0.00	18.57	23.80	23.80	0.064

i	ETPi	Precip	δi	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci	
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3	
2003	6	81.0	0.0	227.98	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.14	10.43	10.43	0.028
2003	7	85.7	0.0	232.69	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.57	4.57	4.57	0.012
2003	8	94.4	0.2	241.37	44.10	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	1.56	2.00	2.00	0.005
2003	9	102.8	1.2	249.75	44.10	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.68	0.88	0.88	0.002
2003	10	123.2	49.8	270.16	44.10	0.14	0.00	49.62	0.14	0.00	0.39	0.43	0.43	0.001
2003	11	124.0	55.4	270.98	44.10	0.53	0.00	54.85	0.53	0.00	0.52	0.40	0.40	0.001
2003	12	117.7	185.5	264.69	44.10	55.24	12.58	117.69	47.42	7.82	31.62	16.32	24.14	0.065
2004	1	116.8	141.4	251.25	40.33	32.73	4.39	116.83	29.81	2.91	33.59	27.84	30.75	0.083
2004	2	102.3	302.2	244.92	42.78	145.81	58.48	102.31	101.59	44.22	81.97	53.21	97.43	0.262
2004	3	106.4	259.5	194.87	26.56	135.21	76.39	106.35	96.33	38.88	99.69	78.61	117.49	0.316
2004	4	95.9	62.2	166.46	21.18	9.03	33.72	95.85	8.80	0.24	49.51	58.98	59.21	0.159
2004	5	90.1	10.8	203.35	33.99	0.00	0.00	44.49	0.00	0.00	21.70	27.81	27.81	0.075
2004	6	79.1	5.2	226.12	44.10	0.00	0.00	5.20	0.00	0.00	9.51	12.19	12.19	0.033
2004	7	82.6	3.6	229.56	44.10	0.00	0.00	3.55	0.00	0.00	4.17	5.34	5.34	0.014
2004	8	90.0	19.3	236.99	44.10	0.00	0.00	19.34	0.00	0.00	1.83	2.34	2.34	0.006
2004	9	98.5	144.3	245.53	44.10	33.27	12.48	98.53	30.27	3.01	20.84	11.26	14.26	0.038
2004	10	113.9	59.6	248.45	40.36	1.62	0.00	70.42	1.62	0.01	10.20	12.25	12.26	0.033
2004	11	120.9	93.6	267.89	44.10	8.95	0.00	84.60	8.72	0.23	10.24	8.68	8.91	0.024
2004	12	111.3	225.9	258.29	44.10	83.49	31.15	111.29	66.83	16.66	48.73	28.34	45.00	0.121
2005	1	117.1	68.7	232.96	34.75	4.96	0.00	94.88	4.89	0.07	24.59	29.03	29.10	0.078
2005	2	99.2	124.3	246.20	44.10	22.79	2.33	99.20	21.34	1.45	24.91	21.03	22.48	0.060
2005	3	104.7	240.4	249.37	43.40	96.29	41.72	104.70	74.79	21.50	60.43	39.27	60.77	0.163
2005	4	94.0	11.5	199.27	31.59	0.00	0.00	53.19	0.00	0.00	26.48	33.95	33.95	0.091
2005	5	91.8	2.8	238.76	44.10	0.00	0.00	2.77	0.00	0.00	11.60	14.88	14.88	0.040
2005	6	81.4	1.4	228.42	44.10	0.00	0.00	1.36	0.00	0.00	5.09	6.52	6.52	0.018
2005	7	85.6	7.1	232.60	44.10	0.00	0.00	7.06	0.00	0.00	2.23	2.86	2.86	0.008
2005	8	101.7	12.8	248.65	44.10	0.00	0.00	12.80	0.00	0.00	0.98	1.25	1.25	0.003
2005	9	104.6	3.5	251.62	44.10	0.00	0.00	3.54	0.00	0.00	0.43	0.55	0.55	0.001
2005	10	117.8	1.5	264.79	44.10	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.19	0.24	0.24	0.001
2005	11	125.7	18.4	272.65	44.10	0.00	0.00	18.41	0.00	0.00	0.08	0.11	0.11	0.000
2005	12	117.9	111.7	264.90	44.10	15.82	0.00	95.83	15.11	0.71	10.04	5.15	5.87	0.016
2006	1	114.6	62.6	261.55	44.10	1.45	0.00	61.16	1.45	0.01	5.36	6.13	6.13	0.017
2006	2	99.3	180.8	246.26	44.10	55.11	26.38	99.26	47.33	7.79	33.68	19.01	26.79	0.072
2006	3	103.1	152.3	223.68	36.19	44.38	31.19	103.06	39.19	5.19	40.70	32.17	37.36	0.100
2006	4	92.7	62.1	208.49	34.74	3.72	0.00	89.56	3.68	0.04	20.27	24.11	24.15	0.065
2006	5	90.1	14.9	237.06	44.10	0.00	0.00	14.92	0.00	0.00	8.88	11.39	11.39	0.031
2006	6	80.3	10.5	227.33	44.10	0.00	0.00	10.50	0.00	0.00	3.89	4.99	4.99	0.013
2006	7	86.2	7.3	233.15	44.10	0.00	0.00	7.29	0.00	0.00	1.71	2.19	2.19	0.006
2006	8	94.8	10.5	241.78	44.10	0.00	0.00	10.52	0.00	0.00	0.75	0.96	0.96	0.003
2006	9	107.2	87.7	254.19	44.10	7.49	0.00	80.20	7.33	0.16	5.18	2.90	3.06	0.008
2006	10	120.4	37.1	267.35	44.10	0.00	0.00	37.12	0.00	0.00	2.27	2.91	2.91	0.008
2006	11	114.3	106.2	261.33	44.10	13.81	0.00	92.41	13.27	0.55	9.78	5.76	6.31	0.017
2006	12	118.5	146.5	265.48	44.10	32.38	0.00	114.11	29.53	2.85	23.83	15.47	18.33	0.049
2007	1	114.6	261.6	261.59	44.10	108.77	38.26	114.59	82.11	26.66	64.80	41.14	67.80	0.182
2007	2	104.8	290.4	213.50	32.62	151.48	72.42	104.76	104.31	47.17	97.45	71.66	118.83	0.320
2007	3	103.9	257.0	178.50	22.38	140.91	84.62	103.92	99.19	41.72	108.37	88.27	129.99	0.350
2007	4	91.3	128.4	153.71	18.71	49.19	72.53	91.33	42.89	6.30	75.88	75.37	81.67	0.220
2007	5	89.0	8.9	163.48	22.34	0.00	0.00	81.42	0.00	0.00	33.25	42.63	42.63	0.115
2007	6	79.6	2.6	226.59	44.10	0.00	0.00	2.55	0.00	0.00	14.57	18.68	18.68	0.050
2007	7	85.0	0.3	231.95	44.10	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	6.39	8.19	8.19	0.022
2007	8	99.9	6.1	246.86	44.10	0.00	0.00	6.12	0.00	0.00	2.80	3.59	3.59	0.010
2007	9	99.2	19.2	246.22	44.10	0.00	0.00	19.21	0.00	0.00	1.23	1.57	1.57	0.004
2007	10	120.3	50.7	267.26	44.10	0.19	0.00	50.48	0.19	0.00	0.66	0.75	0.75	0.002
2007	11	123.7	76.0	270.66	44.10	3.94	0.00	72.09	3.90	0.05	2.87	1.69	1.74	0.005
2007	12	118.3	175.6	265.30	44.10	49.05	8.29	118.30	42.79	6.27	29.58	16.08	22.34	0.060
2008	1	111.5	254.9	250.16	41.61	107.80	43.88	111.45	81.56	26.25	66.95	44.19	70.43	0.189
2008	2	103.3	126.1	206.38	30.93	33.47	33.26	103.26	30.43	3.04	49.48	47.90	50.94	0.137
2008	3	107.0	94.0	220.69	34.12	14.56	5.77	106.95	13.95	0.61	30.92	32.51	33.12	0.089
2008	4	97.8	6.0	239.07	42.37	0.00	0.00	11.81	0.00	0.00	13.55	17.37	17.37	0.047
2008	5	89.3	0.2	236.29	44.10	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	5.94	7.61	7.61	0.020
2008	6	79.3	0.4	226.33	44.10	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	2.60	3.34	3.34	0.009
2008	7	85.8	0.2	232.81	44.10	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	1.14	1.46	1.46	0.004
2008	8	101.8	13.8	248.79	44.10	0.00	0.00	13.78	0.00	0.00	0.50	0.64	0.64	0.002
2008	9	107.6	23.4	254.58	44.10	0.00	0.00	23.35	0.00	0.00	0.22	0.28	0.28	0.001
2008	10	117.6	95.2	264.57	44.10	9.61	0.00	85.57	9.34	0.27	6.28	3.28	3.55	0.010
2008	11	122.2	80.4	269.24	44.10	5.03	0.00	75.33	4.96	0.07	6.03	5.20	5.28	0.014

i	ETPi	Precip	δi	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci	
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3	
2008	12	119.2	211.5	266.20	44.10	71.91	20.34	119.20	59.20	12.71	41.84	23.40	36.11	0.097
2009	1	110.8	106.5	237.44	38.00	17.53	0.00	109.34	16.65	0.87	29.36	29.13	30.00	0.081
2009	2	98.0	280.9	244.96	44.10	128.13	54.82	97.96	92.68	35.45	74.22	47.82	83.27	0.224
2009	3	105.5	80.1	197.66	27.65	12.34	17.05	105.48	11.91	0.44	40.41	45.72	46.16	0.124
2009	4	90.2	65.3	220.18	38.99	3.33	0.00	78.99	3.30	0.03	19.89	23.81	23.85	0.064
2009	5	87.8	36.9	234.82	44.10	0.00	0.00	36.93	0.00	0.00	8.72	11.17	11.17	0.030
2009	6	81.1	9.2	228.14	44.10	0.00	0.00	9.18	0.00	0.00	3.82	4.90	4.90	0.013
2009	7	84.5	10.7	231.46	44.10	0.00	0.00	10.72	0.00	0.00	1.67	2.15	2.15	0.006
2009	8	99.9	14.2	246.91	44.10	0.00	0.00	14.22	0.00	0.00	0.73	0.94	0.94	0.003
2009	9	107.7	53.6	254.73	44.10	0.41	0.00	53.20	0.41	0.00	0.59	0.55	0.55	0.001
2009	10	121.1	50.1	268.11	44.10	0.15	0.00	49.91	0.15	0.00	0.36	0.39	0.39	0.001
2009	11	116.5	189.1	263.46	44.10	57.70	14.93	116.46	49.22	8.48	32.74	16.84	25.32	0.068
2009	12	118.5	144.3	250.61	39.62	34.72	5.99	118.54	31.46	3.26	35.18	29.03	32.29	0.087
2010	1	112.1	175.2	253.13	42.30	51.37	17.68	112.12	44.54	6.83	44.90	34.82	41.65	0.112
2010	2	102.0	223.7	231.35	38.80	90.56	48.76	102.03	71.29	19.27	66.87	49.32	68.59	0.185
2010	3	106.3	164.1	204.53	29.47	58.53	48.05	106.29	49.83	8.71	62.29	54.41	63.11	0.170
2010	4	94.8	81.3	193.70	29.69	12.33	22.22	94.75	11.90	0.44	35.17	39.01	39.45	0.106
2010	5	89.3	13.1	214.11	37.44	0.00	0.00	35.35	0.00	0.00	15.41	19.76	19.76	0.053
2010	6	79.6	0.0	226.62	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.75	8.66	8.66	0.023
2010	7	87.8	0.0	234.82	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.96	3.79	3.79	0.010
2010	8	100.9	0.1	247.94	44.10	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	1.30	1.66	1.66	0.004
2010	9	105.9	19.2	252.86	44.10	0.00	0.00	19.16	0.00	0.00	0.57	0.73	0.73	0.002
2010	10	120.0	3.1	266.95	44.10	0.00	0.00	3.10	0.00	0.00	0.25	0.32	0.32	0.001
2010	11	124.6	40.2	271.59	44.10	0.00	0.00	40.21	0.00	0.00	0.11	0.14	0.14	0.000
2010	12	115.5	185.4	262.54	44.10	55.50	14.36	115.54	47.61	7.89	31.57	16.15	24.04	0.065
2011	1	113.1	245.2	245.71	39.79	102.55	43.90	113.07	78.51	24.03	65.81	44.27	68.30	0.184
2011	2	98.9	346.5	201.99	30.93	204.65	86.87	98.89	127.04	77.61	112.94	79.91	157.52	0.424
2011	3	102.3	231.8	162.41	18.04	127.60	88.80	102.28	92.40	35.20	110.66	94.68	129.87	0.349
2011	4	91.2	161.2	149.36	17.46	74.96	83.88	91.16	61.25	13.71	89.05	82.87	96.58	0.260
2011	5	87.0	2.7	150.16	18.93	0.00	0.00	86.58	0.00	0.00	39.02	50.02	50.02	0.135
2011	6	79.2	5.3	226.21	44.10	0.00	0.00	5.27	0.00	0.00	17.10	21.92	21.92	0.059
2011	7	83.7	0.0	230.67	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.49	9.61	9.61	0.026
2011	8	97.2	10.0	244.18	44.10	0.00	0.00	10.03	0.00	0.00	3.28	4.21	4.21	0.011
2011	9	102.8	46.8	249.76	44.10	0.03	0.00	46.75	0.03	0.00	1.46	1.86	1.86	0.005
2011	10	116.8	62.3	263.83	44.10	1.40	0.00	60.92	1.39	0.01	1.56	1.29	1.30	0.003
2011	11	119.5	130.0	266.53	44.10	23.93	0.00	106.06	22.33	1.60	15.47	8.42	10.02	0.027
2011	12	114.3	166.5	261.25	44.10	44.10	8.12	114.25	38.97	5.13	32.58	21.86	26.99	0.073
2012	1	116.2	190.8	255.10	41.67	61.33	21.35	116.22	51.84	9.49	48.59	35.82	45.31	0.122
2012	2	105.0	300.3	230.61	37.70	151.41	65.30	104.96	104.28	47.13	90.33	62.55	109.68	0.295
2012	3	104.7	174.9	186.35	24.51	72.42	63.11	104.65	59.54	12.87	79.00	70.87	83.74	0.225
2012	4	94.7	100.9	178.63	25.17	25.00	44.22	94.74	23.26	1.74	50.02	52.24	53.98	0.145
2012	5	88.3	1.6	191.09	30.83	0.00	0.00	45.86	0.00	0.00	21.92	28.10	28.10	0.076
2012	6	77.5	7.7	224.50	44.10	0.00	0.00	7.67	0.00	0.00	9.61	12.31	12.31	0.033
2012	7	84.6	3.3	231.55	44.10	0.00	0.00	3.26	0.00	0.00	4.21	5.40	5.40	0.015
2012	8	98.5	10.9	245.48	44.10	0.00	0.00	10.89	0.00	0.00	1.84	2.36	2.36	0.006
2012	9	104.7	55.0	251.65	44.10	0.54	0.00	54.41	0.54	0.00	1.16	1.22	1.22	0.003
2012	10	121.6	54.4	268.58	44.10	0.46	0.00	53.98	0.45	0.00	0.81	0.81	0.81	0.002
2012	11	119.6	28.1	266.60	44.10	0.00	0.00	28.07	0.00	0.00	0.36	0.46	0.46	0.001
2012	12	111.5	199.3	258.53	44.10	65.19	22.62	111.53	54.57	10.62	36.28	18.65	29.27	0.079
2013	1	116.2	82.3	240.61	37.31	8.13	0.00	96.73	7.94	0.19	21.16	23.07	23.26	0.063
2013	2	96.1	183.5	243.10	44.10	57.44	29.98	96.10	49.03	8.41	41.73	28.46	36.86	0.099
2013	3	106.7	30.9	223.70	35.11	0.00	0.00	60.85	0.00	0.00	18.29	23.44	23.44	0.063
2013	4	99.4	7.8	246.42	44.10	0.00	0.00	7.75	0.00	0.00	8.01	10.27	10.27	0.028
2013	5	87.1	25.5	234.11	44.10	0.00	0.00	25.53	0.00	0.00	3.51	4.50	4.50	0.012
2013	6	76.7	8.4	223.73	44.10	0.00	0.00	8.37	0.00	0.00	1.54	1.97	1.97	0.005
2013	7	81.0	12.4	227.95	44.10	0.00	0.00	12.41	0.00	0.00	0.67	0.86	0.86	0.002
2013	8	96.4	27.4	243.41	44.10	0.00	0.00	27.40	0.00	0.00	0.30	0.38	0.38	0.001
2013	9	105.3	62.1	252.27	44.10	1.42	0.00	60.63	1.42	0.01	1.07	0.65	0.65	0.002
2013	10	115.4	46.4	262.39	44.10	0.02	0.00	46.40	0.02	0.00	0.48	0.61	0.61	0.002
2013	11	121.8	88.8	268.84	44.10	7.41	0.00	81.37	7.25	0.16	5.01	2.72	2.88	0.008
2013	12	115.5	125.1	262.53	44.10	21.90	0.00	103.17	20.55	1.34	15.80	9.76	11.11	0.030
2014	1	111.3	194.4	258.31	44.10	61.99	21.12	111.31	52.31	9.68	41.55	26.56	36.24	0.097
2014	2	97.7	203.5	223.56	37.76	78.10	48.79	97.68	63.34	14.77	60.14	44.75	59.52	0.160
2014	3	103.2	285.8	201.45	29.46	153.38	77.94	103.24	105.21	48.17	96.00	69.35	117.52	0.316
2014	4	93.7	67.1	162.72	20.72	11.41	39.95	93.66	11.04	0.38	49.38	57.66	58.04	0.156
2014	5	87.5	24.2	194.59	32.11	0.00	0.00	64.12	0.00	0.00	21.64	27.74	27.74	0.075

i	ETPi	Precip	$\delta i$	Poi	Ti	Hi	ETRi	li	Asupi	V	Asubi	A	Vol Esci	
Año	mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Hm3	
2014	6	79.8	5.1	226.76	44.10	0.00	0.00	5.08	0.00	0.00	9.48	12.16	12.16	0.033
2014	7	83.4	8.1	230.36	44.10	0.00	0.00	8.07	0.00	0.00	4.16	5.33	5.33	0.014
2014	8	95.8	20.6	242.77	44.10	0.00	0.00	20.57	0.00	0.00	1.82	2.33	2.33	0.006





BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE ENTRE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

Presa Champacocha

ISD Índice de Satisfacción de la Demanda: 84.07 %

año	mes	Vesci (Hm3)	Prec. (mm)	Ht	Hv	Ar	Vdi	VolHt	VolHv	ISD Índice de Satisfacción de la Demanda							Aporte total (Hm3)		
				4413.0	4421.8	100.0		0.00	0.29	Aembau	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri			
				Evap.	Dem.	Pi-Evi			Vsi	Vemb	Aemb	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri	Aporte total	
				(mm)	(mm)	(Hm3)/Há			(Hm3)	(Hm3)	(Ha)				(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Hm3)	(Hm3)
1988	7	0.01	4.04	88.66	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.055	0.00	0.08	-0.055	0.001	0.16	0.000	0.004	0.007		
1988	8	0.00	9.2	104.74	19.59	-0.0010	0.020	0.001	-0.017	0.00	0.08	-0.017	0.001	0.16	0.000	0.002	0.003		
1988	9	0.00	58.62	112.16	25.65	-0.0005	0.026	0.000	-0.023	0.00	0.08	-0.023	0.001	0.16	0.000	0.002	0.002		
1988	10	0.00	37.04	128.01	0.00	-0.0009	0.000	0.000	-0.002	0.35	0.26	0.002	0.002	0.32	0.000	0.000	0.001		
1988	11	0.00	48.79	130.62	0.00	-0.0008	0.000	0.000	0.002	0.37	0.34	0.002	0.002	0.33	0.000	0.000	0.000		
1988	12	0.02	120.61	123.62	35.14	0.0000	0.035	0.004	-0.017	0.00	0.17	-0.017	0.001	0.16	0.000	0.017	0.020		
1989	1	0.07	172.02	112.37	25.50	0.0006	0.025	0.020	0.029	1.90	1.03	0.029	0.029	1.91	0.000	0.025	0.074		
1989	2	0.08	134.33	96.49	55.78	0.0004	0.056	0.052	0.006	0.70	1.31	0.006	0.006	0.71	0.000	0.056	0.085		
1989	3	0.19	235.4	104.32	78.51	0.0013	0.079	0.053	0.061	3.00	1.85	0.062	0.062	3.03	0.000	0.079	0.188		
1989	4	0.13	112.5	88.13	99.06	-0.0002	0.099	0.029	0.067	3.18	3.11	0.066	0.066	3.16	0.000	0.099	0.133		
1989	5	0.07	18.81	85.01	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.026	1.79	2.47	0.024	0.024	1.69	0.000	0.098	0.070		
1989	6	0.03	3.52	75.05	84.60	-0.0007	0.085	0.006	-0.035	0.00	0.84	-0.035	0.001	0.16	0.000	0.049	0.031		
1989	7	0.01	0.41	84.04	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.048	0.00	0.08	-0.048	0.001	0.16	0.000	0.011	0.014		
1989	8	0.01	27.22	94.96	19.59	-0.0007	0.020	0.001	-0.014	0.00	0.08	-0.014	0.001	0.16	0.000	0.005	0.006		
1989	9	0.00	40.88	110.08	25.65	-0.0007	0.026	0.000	-0.023	0.00	0.08	-0.023	0.001	0.16	0.000	0.002	0.003		
1989	10	0.00	30.16	117.60	0.00	-0.0009	0.000	0.000	-0.002	0.31	0.24	0.001	0.001	0.28	0.000	0.000	0.001		
1989	11	0.00	37.38	128.63	0.00	-0.0009	0.000	0.000	0.002	0.30	0.29	0.001	0.001	0.27	0.000	0.000	0.000		
1989	12	0.00	6.4	134.38	35.14	-0.0013	0.035	0.004	-0.038	0.00	0.13	-0.038	0.001	0.16	0.000	0.000	0.000		
1990	1	0.07	186.35	118.38	25.50	0.0007	0.025	0.020	0.021	1.57	0.87	0.022	0.022	1.59	0.000	0.025	0.066		
1990	2	0.07	117.25	103.35	55.78	0.0001	0.056	0.052	-0.015	0.00	0.79	-0.015	0.001	0.16	0.000	0.040	0.071		
1990	3	0.06	113.78	111.36	78.51	0.0000	0.079	0.053	-0.070	0.00	0.08	-0.070	0.001	0.16	0.000	0.008	0.061		
1990	4	0.04	78	99.30	99.06	-0.0002	0.099	0.029	-0.087	0.00	0.08	-0.087	0.001	0.16	0.000	0.012	0.041		
1990	5	0.02	34.51	89.87	98.36	-0.0006	0.098	0.013	-0.090	0.00	0.08	-0.090	0.001	0.16	0.000	0.008	0.021		
1990	6	0.01	26.34	75.93	84.60	-0.0005	0.085	0.006	-0.081	0.00	0.08	-0.081	0.001	0.16	0.000	0.003	0.009		
1990	7	0.00	2.69	85.54	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.057	0.00	0.08	-0.058	0.001	0.16	0.000	0.001	0.004		
1990	8	0.00	27.59	97.14	19.59	-0.0007	0.020	0.001	-0.018	0.00	0.08	-0.018	0.001	0.16	0.000	0.001	0.002		
1990	9	0.01	77.04	106.30	25.65	-0.0003	0.026	0.000	-0.020	0.00	0.08	-0.020	0.001	0.16	0.000	0.005	0.005		
1990	10	0.01	91.24	117.95	0.00	-0.0003	0.000	0.000	0.013	1.17	0.67	0.013	0.013	1.16	0.000	0.000	0.013		
1990	11	0.08	190.37	109.64	0.00	0.0008	0.000	0.000	0.093	3.93	2.54	0.095	0.095	3.96	0.000	0.000	0.082		
1990	12	0.09	130.46	107.86	35.14	0.0002	0.035	0.004	0.141	5.08	4.52	0.141	0.141	5.07	0.000	0.035	0.085		
1991	1	0.13	197.89	109.78	25.50	0.0009	0.025	0.020	0.227	6.83	5.95	0.229	0.229	6.87	0.000	0.025	0.133		
1991	2	0.21	228.4	92.57	55.78	0.0014	0.056	0.052	0.327	8.59	7.73	0.332	0.294	8.03	0.038	0.056	0.211		
1991	3	0.14	110.62	95.23	78.51	0.0002	0.079	0.053	0.302	8.17	8.10	0.299	0.294	8.03	0.005	0.079	0.137		
1991	4	0.07	20.43	84.84	99.06	-0.0006	0.099	0.029	0.240	7.08	7.55	0.233	0.233	6.95	0.000	0.099	0.068		
1991	5	0.03	42.06	81.88	98.36	-0.0004	0.098	0.013	0.154	5.37	6.16	0.151	0.151	5.30	0.000	0.098	0.029		
1991	6	0.01	7.14	76.61	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.075	3.42	4.36	0.071	0.071	3.32	0.000	0.085	0.011		
1991	7	0.01	0	86.39	59.49	-0.0009	0.059	0.003	0.016	1.29	2.31	0.014	0.014	1.18	0.000	0.059	0.004		
1991	8	0.00	0	97.07	19.59	-0.0010	0.020	0.001	-0.004	0.00	0.59	-0.005	0.001	0.16	0.000	0.014	0.002		
1991	9	0.00	65.84	108.95	25.65	-0.0004	0.026	0.000	-0.022	0.00	0.08	-0.022	0.001	0.16	0.000	0.003	0.003		
1991	10	0.00	57.85	121.09	0.00	-0.0006	0.000	0.000	0.004	0.53	0.35	0.004	0.004	0.51	0.000	0.000	0.003		
1991	11	0.00	9.35	124.06	0.00	-0.0011	0.000	0.000	0.005	0.64	0.58	0.004	0.004	0.59	0.000	0.000	0.001		
1991	12	0.00	3.37	131.84	35.14	-0.0013	0.035	0.004	-0.034	0.00	0.29	-0.034	0.001	0.16	0.000	0.000	0.000		
1992	1	0.03	131.06	122.21	25.50	0.0001	0.025	0.020	-0.019	0.00	0.08	-0.019	0.001	0.16	0.000	0.006	0.026		
1992	2	0.17	255.41	108.22	55.78	0.0015	0.056	0.052	0.059	2.95	1.56	0.060	0.060	2.99	0.000	0.056	0.168		
1992	3	0.12	117.1	105.37	78.51	0.0001	0.079	0.053	0.050	2.64	2.82	0.049	0.049	2.61	0.000	0.079	0.120		
1992	4	0.08	82.65	91.10	99.06	-0.0001	0.099	0.029	-0.004	0.00	1.31	-0.004	0.001	0.16	0.000	0.094	0.075		
1992	5	0.04	2	96.11	98.36	-0.0009	0.098	0.013	-0.072	0.00	0.08	-0.072	0.001	0.16	0.000	0.025	0.039		
1992	6	0.02	6.36	82.62	84.60	-0.0008	0.085	0.006	-0.073	0.00	0.08	-0.073	0.001	0.16	0.000	0.011	0.017		
1992	7	0.01	3.34	88.13	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.054	0.00	0.08	-0.054	0.001	0.16	0.000	0.005	0.007		
1992	8	0.00	17.79	97.58	19.59	-0.0008	0.020	0.001	-0.017	0.00	0.08	-0.017	0.001	0.16	0.000	0.002	0.003		
1992	9	0.00	1.69	109.54	25.65	-0.0011	0.026	0.000	-0.024	0.00	0.08	-0.024	0.001	0.16	0.000	0.001	0.001		
1992	10	0.00	70.07	120.70	0.00	-0.0005	0.000	0.000	0.004	0.52	0.34	0.003	0.003	0.50	0.000	0.000	0.003		
1992	11	0.01	90.04	126.82	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.014	1.18	0.84	0.013	0.013	1.16	0.000	0.000	0.010		
1992	12	0.02	91.83	123.65	35.14	-0.0003	0.035	0.004	-0.009	0.00	0.58	-0.010	0.001	0.16	0.000	0.025	0.017		
1993	1	0.31	365.45	122.33	25.50	0.0024	0.025	0.020	0.265	7.52	3.84	0.269	0.269	7.61	0.000	0.025	0.314		
1993	2	0.30	244.58	95.35	55.78	0.0015	0.056	0.052	0.462	10.65	9.13	0.465	0.294	8.03	0.172	0.056	0.304		
1993	3	0.36	261.77	99.04	78.51	0.0016	0.079	0.053	0.523	11.50	9.77	0.525	0.294	8.03	0.232	0.079	0.364		
1993	4	0.30	196.84	86.11	99.06	0.0011	0.099	0.029	0.469	10.75	9.39	0.469	0.294	8.03	0.175	0.099	0.303		
1993	5	0.15	1.04	83.46	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.334	8.70	8.37	0.322	0.294	8.03	0.029	0.098	0.140		
1993	6	0.07	1.84	74.86	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.270	7.62	7.82	0.262	0.262	7.48	0.000	0.085	0.059		
1993	7	0.03	6.48	79.37	59.49	-0.0007	0.059	0.003	0.229	6.88	7.18	0.223	0.223	6.77	0.000	0.059	0.023		
1993	8	0.01	15.16	85.96	19.59	-0.0007	0.020	0.001	0.215	6.62	6.69	0.210	0.210	6.52	0.000	0.020	0.008		
1993	9	0.02	108.31	95.29	25.65	0.0001	0.026	0.000	0.205	6.42	6.47	0.206	0.206	6.43	0.000	0.026	0.021		
1993	10	0.05	137.35	109.59	0.00	0.0003	0.000	0.000	0.252	7.30	6.86	0.253	0.253	7.31	0.000	0.000	0.047		
1993	11	0.04	96.99	107.72	0.00	-0.													

BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE ENTRE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

Presa Champacocha

año	mes	Vesci (Hm3)	Prec. (mm)	Ht	Hv	Ar	Vdi (Hm3)	VolHt	VolHv	ISD Índice de Satisfacción de la Demanda							Aporte total (Hm3)
				4413.0	4421.8	100.0		0.00	0.29	Aembau	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri	
				Evap. (mm)	Dem. (mm)	Pi-Evi (Hm3)/Há		Vsi (Hm3)	Vemb (Hm3)	ux (Ha)			(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Hm3)	
1994	7	0.01	15.85	82.21	59.49	-0.0007	0.059	0.003	0.108	4.30	4.88	0.105	0.105	4.22	0.000	0.059	0.008
1994	8	0.01	15.59	93.58	19.59	-0.0008	0.020	0.001	0.089	3.81	4.01	0.086	0.086	3.73	0.000	0.020	0.002
1994	9	0.03	128.99	99.10	25.65	0.0003	0.026	0.000	0.088	3.78	3.75	0.089	0.089	3.80	0.000	0.026	0.028
1994	10	0.02	43.67	116.39	0.00	-0.0007	0.000	0.000	0.112	4.41	4.10	0.109	0.109	4.33	0.000	0.000	0.021
1994	11	0.05	147.63	114.41	0.00	0.0003	0.000	0.000	0.154	5.37	4.85	0.155	0.155	5.39	0.000	0.000	0.046
1994	12	0.04	73.51	117.83	35.14	-0.0004	0.035	0.004	0.153	5.35	5.37	0.150	0.150	5.28	0.000	0.035	0.034
1995	1	0.08	181.15	113.79	25.50	0.0007	0.025	0.020	0.183	5.98	5.63	0.185	0.185	6.03	0.000	0.025	0.081
1995	2	0.18	240.59	99.89	55.78	0.0014	0.056	0.052	0.261	7.46	6.74	0.266	0.266	7.54	0.000	0.056	0.188
1995	3	0.30	272.97	101.80	78.51	0.0017	0.079	0.053	0.434	10.24	8.89	0.439	0.294	8.03	0.145	0.079	0.306
1995	4	0.16	87.98	95.69	99.06	-0.0001	0.099	0.029	0.328	8.59	8.31	0.322	0.294	8.03	0.028	0.099	0.156
1995	5	0.08	14.07	86.62	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.263	7.50	7.76	0.255	0.255	7.35	0.000	0.098	0.073
1995	6	0.04	2.69	76.44	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.200	6.32	6.84	0.194	0.194	6.20	0.000	0.085	0.029
1995	7	0.02	0.01	83.09	59.49	-0.0008	0.059	0.003	0.148	5.23	5.72	0.143	0.143	5.12	0.000	0.059	0.010
1995	8	0.01	1.32	99.45	19.59	-0.0010	0.020	0.001	0.129	4.80	4.96	0.124	0.124	4.68	0.000	0.020	0.002
1995	9	0.00	14.25	99.47	25.65	-0.0009	0.026	0.000	0.101	4.12	4.40	0.097	0.097	4.02	0.000	0.026	-0.001
1995	10	0.00	48.92	117.74	0.00	-0.0007	0.000	0.000	0.098	4.06	4.04	0.096	0.096	3.98	0.000	0.000	-0.001
1995	11	0.01	92.75	111.67	0.00	-0.0002	0.000	0.000	0.104	4.21	4.10	0.103	0.103	4.18	0.000	0.000	0.008
1995	12	0.01	76.01	116.94	35.14	-0.0004	0.035	0.004	0.077	3.47	3.83	0.075	0.075	3.42	0.000	0.035	0.011
1996	1	0.17	274.81	116.40	25.50	0.0016	0.025	0.020	0.200	6.31	4.87	0.205	0.205	6.41	0.000	0.025	0.175
1996	2	0.34	305.37	102.32	55.78	0.0020	0.056	0.052	0.432	10.22	8.31	0.439	0.294	8.03	0.145	0.056	0.342
1996	3	0.21	147.95	101.66	78.51	0.0005	0.079	0.053	0.377	9.38	8.71	0.374	0.294	8.03	0.080	0.079	0.212
1996	4	0.12	62.77	87.57	99.06	-0.0002	0.099	0.029	0.286	7.89	7.96	0.280	0.280	7.80	0.000	0.099	0.115
1996	5	0.06	8.19	84.86	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.225	6.80	7.30	0.218	0.218	6.67	0.000	0.098	0.049
1996	6	0.02	0	76.96	84.60	-0.0008	0.085	0.006	0.152	5.33	6.00	0.147	0.147	5.22	0.000	0.085	0.020
1996	7	0.01	0.22	81.78	59.49	-0.0008	0.059	0.003	0.096	4.00	4.61	0.092	0.092	3.89	0.000	0.059	0.007
1996	8	0.00	12.28	91.86	19.59	-0.0008	0.020	0.001	0.076	3.46	3.68	0.073	0.073	3.37	0.000	0.020	0.002
1996	9	0.00	31.99	106.05	25.65	-0.0007	0.026	0.000	0.049	2.64	3.01	0.047	0.047	2.57	0.000	0.026	0.000
1996	10	0.00	26.8	122.75	0.00	-0.0010	0.000	0.000	0.048	2.59	2.58	0.046	0.046	2.51	0.000	0.000	-0.002
1996	11	0.01	94.57	122.73	0.00	-0.0003	0.000	0.000	0.054	2.80	2.66	0.054	0.054	2.78	0.000	0.000	0.008
1996	12	0.03	128.42	120.59	35.14	0.0001	0.035	0.004	0.047	2.56	2.67	0.047	0.047	2.55	0.000	0.035	0.033
1997	1	0.14	232.39	115.30	25.50	0.0012	0.025	0.020	0.139	5.03	3.79	0.141	0.141	5.08	0.000	0.025	0.140
1997	2	0.13	152.53	97.91	55.78	0.0005	0.056	0.052	0.165	5.59	5.34	0.165	0.165	5.60	0.000	0.056	0.132
1997	3	0.16	189.95	105.81	78.51	0.0008	0.079	0.053	0.194	6.19	5.90	0.195	0.195	6.22	0.000	0.079	0.162
1997	4	0.09	11.41	95.78	99.06	-0.0008	0.099	0.029	0.158	5.45	5.84	0.151	0.151	5.30	0.000	0.099	0.084
1997	5	0.04	26.15	85.93	98.36	-0.0006	0.098	0.013	0.079	3.55	4.43	0.076	0.076	3.46	0.000	0.098	0.037
1997	6	0.02	2.14	83.36	84.60	-0.0008	0.085	0.006	0.003	0.47	1.97	0.001	0.001	0.29	0.000	0.085	0.016
1997	7	0.01	7.08	90.58	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.053	0.00	0.15	-0.053	0.001	0.16	0.000	0.006	0.008
1997	8	0.00	43.84	96.84	19.59	-0.0005	0.020	0.001	-0.017	0.00	0.08	-0.017	0.001	0.16	0.000	0.002	0.003
1997	9	0.00	61	110.57	25.65	-0.0005	0.026	0.000	-0.023	0.00	0.08	-0.023	0.001	0.16	0.000	0.002	0.003
1997	10	0.01	85.85	129.10	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.008	0.88	0.52	0.008	0.008	0.86	0.000	0.000	0.008
1997	11	0.01	87.14	123.55	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.022	1.58	1.22	0.021	0.021	1.56	0.000	0.000	0.013
1997	12	0.03	126.3	121.27	35.14	0.0001	0.035	0.004	0.014	1.22	1.39	0.014	0.014	1.22	0.000	0.035	0.032
1998	1	0.10	197.03	112.21	25.50	0.0008	0.025	0.020	0.070	3.28	2.25	0.071	0.071	3.31	0.000	0.025	0.102
1998	2	0.15	195.29	96.44	55.78	0.0010	0.056	0.052	0.116	4.51	3.91	0.118	0.118	4.55	0.000	0.056	0.155
1998	3	0.13	126.67	99.12	78.51	0.0003	0.079	0.053	0.111	4.38	4.46	0.110	0.110	4.36	0.000	0.079	0.124
1998	4	0.07	42.09	89.21	99.06	-0.0005	0.099	0.029	0.052	2.74	3.55	0.050	0.050	2.65	0.000	0.099	0.068
1998	5	0.03	1.64	92.16	98.36	-0.0009	0.098	0.013	-0.031	0.00	1.33	-0.032	0.001	0.16	0.000	0.066	0.030
1998	6	0.01	9.2	81.96	84.60	-0.0007	0.085	0.006	-0.076	0.00	0.08	-0.076	0.001	0.16	0.000	0.008	0.014
1998	7	0.01	3.03	89.44	59.49	-0.0009	0.059	0.003	-0.056	0.00	0.08	-0.056	0.001	0.16	0.000	0.003	0.006
1998	8	0.00	0.18	102.61	19.59	-0.0010	0.020	0.001	-0.018	0.00	0.08	-0.018	0.001	0.16	0.000	0.001	0.003
1998	9	0.00	11.58	115.47	25.65	-0.0010	0.026	0.000	-0.024	0.00	0.08	-0.024	0.001	0.16	0.000	0.001	0.001
1998	10	0.00	22.37	125.78	0.00	-0.0010	0.000	0.000	0.001	0.22	0.19	0.001	0.001	0.19	0.000	0.000	0.000
1998	11	0.00	40.59	129.85	0.00	-0.0009	0.000	0.000	0.001	0.17	0.18	0.000	0.001	0.16	0.000	0.000	0.000
1998	12	0.00	6.28	123.45	35.14	-0.0012	0.035	0.004	-0.039	0.00	0.08	-0.039	0.001	0.16	0.000	0.000	0.000
1999	1	0.01	84.78	119.71	25.50	-0.0003	0.025	0.020	-0.039	0.00	0.08	-0.039	0.001	0.16	0.000	0.000	0.006
1999	2	0.29	345.83	100.51	55.78	0.0025	0.056	0.052	0.178	5.88	3.02	0.182	0.182	5.96	0.000	0.056	0.290
1999	3	0.26	214.03	98.41	78.51	0.0012	0.079	0.053	0.309	8.29	7.13	0.311	0.294	8.03	0.017	0.079	0.260
1999	4	0.20	140.98	86.82	99.06	0.0005	0.099	0.029	0.361	9.13	8.58	0.359	0.294	8.03	0.065	0.099	0.194
1999	5	0.11	54.7	82.09	98.36	-0.0003	0.098	0.013	0.292	8.01	8.02	0.287	0.287	7.91	0.000	0.098	0.105
1999	6	0.05	7.29	77.06	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.248	7.23	7.57	0.242	0.242	7.11	0.000	0.085	0.045
1999	7	0.02	0	79.70	59.49	-0.0008	0.059	0.003	0.202	6.36	6.73	0.196	0.196	6.24	0.000	0.059	0.017
1999	8	0.01	14.25	94.17	19.59	-0.0008	0.020	0.001	0.185	6.02	6.13	0.180	0.180	5.92	0.000	0.020	0.005
1999	9	0.00	22.46	96.80	25.65	-0.0007	0.026	0.000	0.159	5.47	5.69	0.154	0.154	5.38	0.000	0.026	0.000
1999	10	0.01	99.71	106.66	0.00	-0.0001	0.000	0.000	0.167	5.65	5.51	0.167	0.167	5.64	0.000	0.000	0.012
1999	11	0.02	79.05	115.55	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.183	5.97	5.80	0.180	0.180	5.92	0.000	0.000	0.014
1999	12	0.15	258.66	110.89	35.14	0.0015	0.035	0.004	0.292	8.00	6.96	0.299	0.294	8.03	0.005	0.035	0.158
2000	1	0.27	271.3	105.32	25.50	0.0017	0.025	0.020	0.521	11.49	9.76	0.528					

**BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE ENTRE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA**

Presa Champacocha

año	mes	Vesci (Hm3)	Prec. (mm)	Ht	Hv	Ar	Vdi (Hm3)	VolHt	VolHv	ISD Índice de Satisfacción de la Demanda							Aporte total (Hm3)
				4413.0	4421.8	100.0		0.00	0.29	Aembaux	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri	
				Evap. (mm)	Dem. (mm)	Pi-Evi (Hm3)/Há		Vsi (Hm3)	Vemb (Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Hm3)	
2000	8	0.01	6.71	88.16	19.59	-0.0008	0.020	0.001	0.141	5.08	5.23	0.137	0.137	4.98	0.000	0.020	0.003
2000	9	0.00	55.62	101.60	25.65	-0.0005	0.026	0.000	0.115	4.47	4.73	0.113	0.113	4.41	0.000	0.026	0.002
2000	10	0.04	152.13	107.18	0.00	0.0004	0.000	0.000	0.153	5.35	4.88	0.155	0.155	5.39	0.000	0.000	0.042
2000	11	0.03	57.35	120.37	0.00	-0.0006	0.000	0.000	0.000	6.09	5.74	0.184	0.184	6.01	0.000	0.000	0.030
2000	12	0.04	129.87	113.57	35.14	0.0002	0.035	0.004	0.185	6.02	6.01	0.185	0.185	6.02	0.000	0.035	0.040
2001	1	0.11	204.87	107.64	25.50	0.0010	0.025	0.020	0.252	7.30	6.66	0.256	0.256	7.37	0.000	0.025	0.116
2001	2	0.09	117.13	98.33	55.78	-0.0002	0.002	0.056	0.052	7.11	7.24	0.240	0.240	7.09	0.000	0.056	0.093
2001	3	0.11	174.63	101.61	78.51	0.0007	0.079	0.053	0.223	6.77	6.93	0.226	0.226	6.81	0.000	0.079	0.117
2001	4	0.07	6.98	90.17	99.06	-0.0008	0.099	0.029	0.167	5.64	6.22	0.160	0.160	5.49	0.000	0.099	0.063
2001	5	0.03	10.35	83.21	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.079	3.53	4.51	0.075	0.075	3.42	0.000	0.098	0.027
2001	6	0.01	5.15	76.53	84.60	-0.0007	0.085	0.006	-0.002	0.00	1.71	-0.003	0.001	0.16	0.000	0.081	0.012
2001	7	0.01	7.5	85.85	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.056	0.00	0.08	-0.056	0.001	0.16	0.000	0.003	0.006
2001	8	0.00	23.19	97.62	19.59	-0.0007	0.020	0.001	-0.018	0.00	0.08	-0.018	0.001	0.16	0.000	0.001	0.003
2001	9	0.00	72.91	107.04	25.65	-0.0003	0.026	0.000	-0.021	0.00	0.08	-0.021	0.001	0.16	0.000	0.004	0.004
2001	10	0.01	85.2	122.62	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.011	1.01	0.59	0.010	0.010	0.99	0.000	0.000	0.010
2001	11	0.01	76.45	124.65	0.00	-0.0005	0.000	0.000	0.022	1.59	1.29	0.021	0.021	1.56	0.000	0.000	0.011
2001	12	0.03	123.95	122.34	35.14	0.0000	0.035	0.004	0.011	1.01	1.29	0.011	0.011	1.01	0.000	0.035	0.029
2002	1	0.02	58.99	125.53	25.50	-0.0007	0.025	0.020	-0.011	0.00	0.50	-0.011	0.001	0.16	0.000	0.014	0.023
2002	2	0.19	282.77	104.95	55.78	0.0018	0.056	0.052	0.085	3.69	1.93	0.087	0.087	3.75	0.000	0.056	0.194
2002	3	0.21	203.69	99.34	78.51	0.0010	0.079	0.053	0.167	5.65	4.70	0.169	0.169	5.68	0.000	0.079	0.214
2002	4	0.14	98.06	89.87	99.06	0.0001	0.099	0.029	0.178	5.88	5.78	0.176	0.176	5.82	0.000	0.099	0.135
2002	5	0.07	53.21	83.54	98.36	-0.0003	0.098	0.013	0.388	5.02	5.42	0.135	0.135	4.94	0.000	0.098	0.071
2002	6	0.03	6.48	74.33	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.079	3.53	4.24	0.075	0.075	3.44	0.000	0.085	0.031
2002	7	0.01	24.85	82.33	59.49	-0.0006	0.059	0.003	0.028	1.86	2.65	0.027	0.027	1.79	0.000	0.059	0.013
2002	8	0.01	5.9	93.10	19.59	-0.0009	0.020	0.001	0.012	1.12	1.46	0.011	0.011	1.04	0.000	0.020	0.005
2002	9	0.01	68.39	105.17	25.65	-0.0004	0.026	0.000	-0.009	0.00	0.52	-0.010	0.001	0.16	0.000	0.016	0.005
2002	10	0.00	30.47	122.14	0.00	-0.0009	0.000	0.000	0.004	0.57	0.37	0.004	0.004	0.54	0.000	0.000	0.003
2002	11	0.01	74.85	121.65	0.00	-0.0005	0.000	0.000	0.009	0.90	0.72	0.008	0.008	0.87	0.000	0.000	0.005
2002	12	0.01	83.46	128.43	35.14	-0.0004	0.035	0.004	-0.021	0.00	0.44	-0.021	0.001	0.16	0.000	0.013	0.010
2003	1	0.04	137.4	124.37	25.50	0.0001	0.025	0.020	-0.008	0.00	0.08	-0.008	0.001	0.16	0.000	0.017	0.037
2003	2	0.18	261.5	107.43	55.78	0.0015	0.056	0.052	0.073	3.37	1.76	0.074	0.074	3.41	0.000	0.056	0.182
2003	3	0.23	222.35	106.47	78.51	0.0012	0.079	0.053	0.172	5.74	4.58	0.173	0.173	5.77	0.000	0.079	0.231
2003	4	0.13	75.01	92.33	99.06	-0.0002	0.099	0.029	0.176	5.83	5.80	0.172	0.172	5.75	0.000	0.099	0.127
2003	5	0.06	1.06	84.08	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.125	4.70	5.23	0.119	0.119	4.57	0.000	0.098	0.058
2003	6	0.03	0	76.93	84.60	-0.0008	0.085	0.006	0.057	2.87	3.72	0.053	0.053	2.77	0.000	0.085	0.025
2003	7	0.01	0	85.69	59.49	-0.0009	0.059	0.003	0.004	0.52	1.64	0.002	0.002	0.37	0.000	0.059	0.011
2003	8	0.01	0.18	99.09	19.59	-0.0010	0.020	0.001	-0.013	0.00	0.19	-0.013	0.001	0.16	0.000	0.006	0.005
2003	9	0.00	1.15	107.89	25.65	-0.0011	0.026	0.000	-0.023	0.00	0.08	-0.023	0.001	0.16	0.000	0.002	0.002
2003	10	0.00	49.76	129.32	0.00	-0.0008	0.000	0.000	0.002	0.31	0.24	0.001	0.001	0.29	0.000	0.000	0.001
2003	11	0.00	55.38	130.18	0.00	-0.0007	0.000	0.000	0.002	0.37	0.33	0.002	0.002	0.34	0.000	0.000	0.001
2003	12	0.06	185.51	123.57	35.14	0.0006	0.035	0.004	0.027	1.83	1.09	0.028	0.028	1.85	0.000	0.035	0.065
2004	1	0.08	141.37	116.83	25.50	0.0002	0.025	0.020	0.065	3.14	2.49	0.065	0.065	3.14	0.000	0.025	0.083
2004	2	0.26	302.2	102.31	55.78	0.0020	0.056	0.052	0.219	6.69	4.91	0.224	0.224	6.78	0.000	0.056	0.267
2004	3	0.32	259.47	101.03	78.51	0.0016	0.079	0.053	0.408	9.86	8.32	0.412	0.294	8.03	0.118	0.079	0.319
2004	4	0.16	62.21	91.06	99.06	-0.0003	0.099	0.029	0.325	8.55	8.29	0.318	0.294	8.03	0.024	0.099	0.152
2004	5	0.07	10.77	85.57	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.257	7.39	7.71	0.249	0.249	7.25	0.000	0.098	0.067
2004	6	0.03	5.2	75.16	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.192	6.15	6.70	0.186	0.186	6.04	0.000	0.085	0.027
2004	7	0.01	3.55	78.43	59.49	-0.0007	0.059	0.003	0.138	5.02	5.53	0.134	0.134	4.92	0.000	0.059	0.010
2004	8	0.01	19.34	85.49	19.59	-0.0007	0.020	0.001	0.119	4.58	4.75	0.116	0.116	4.50	0.000	0.020	0.003
2004	9	0.04	144.28	93.60	25.65	0.0005	0.026	0.000	0.129	4.80	4.65	0.131	0.131	4.84	0.000	0.026	0.040
2004	10	0.03	59.57	108.23	0.00	-0.0005	0.000	0.000	0.163	5.57	5.20	0.160	0.160	5.50	0.000	0.000	0.030
2004	11	0.02	93.55	114.85	0.00	-0.0002	0.000	0.000	0.184	5.99	5.75	0.182	0.182	5.96	0.000	0.000	0.022
2004	12	0.12	225.93	105.73	35.14	0.0012	0.035	0.004	0.264	7.51	6.73	0.269	0.269	7.60	0.000	0.035	0.126
2005	1	0.08	68.69	111.25	25.50	-0.0004	0.025	0.020	0.302	8.17	7.88	0.296	0.294	8.03	0.002	0.025	0.073
2005	2	0.06	124.32	94.24	55.78	0.0003	0.056	0.052	0.246	7.19	7.61	0.247	0.247	7.20	0.000	0.056	0.061
2005	3	0.16	240.38	99.47	78.51	0.0014	0.079	0.053	0.278	7.76	7.48	0.284	0.284	7.87	0.000	0.079	0.169
2005	4	0.09	11.47	89.29	99.06	-0.0008	0.099	0.029	0.247	7.21	7.54	0.239	0.239	7.06	0.000	0.099	0.083
2005	5	0.04	2.77	87.17	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.167	5.65	6.35	0.161	0.161	5.51	0.000	0.098	0.034
2005	6	0.02	1.36	77.35	84.60	-0.0008	0.085	0.006	0.088	3.78	4.65	0.084	0.084	3.68	0.000	0.085	0.014
2005	7	0.01	7.06	81.32	59.49	-0.0007	0.059	0.003	0.030	1.93	2.80	0.028	0.028	1.84	0.000	0.059	0.006
2005	8	0.00	12.8	101.65	19.59	-0.0009	0.020	0.001	0.010	0.99	1.41	0.009	0.009	0.91	0.000	0.020	0.002
2005	9	0.00	3.54	109.85	25.65	-0.0011	0.026	0.000	-0.015	0.00	0.46	-0.016	0.001	0.16	0.000	0.009	0.001
2005	10	0.00	1.45	123.68	0.00	-0.0012	0.000	0.000	0.001	0.24	0.20	0.001	0.001	0.21	0.000	0.000	0.000
2005	11	0.00	18.41	131.93	0.00	-0.0011	0.000	0.000	0.001	0.19	0.20	0.001	0.001	0.16	0.000	0.000	0.000
2005	12	0.02	111.65	123.80	35.14	-0.0001	0.035	0.004	-0.023	0.00	0.08	-0.023	0.001	0.16	0.000	0.012	0.016
2006	1	0.02	62.61	120.28	25.50	-0.0006	0.025	0.020	-0.028	0.00	0.08	-0.028	0.001	0.16	0.000	0.000	0.016
2006	2	0.07	180.75	104.22	55.78	0.0008	0.056	0.052	-0.036	0.00	0.08</						

BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE ENTRE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA

Presa Champacocha

ISD Índice de Satisfacción de la Demanda: 84.07 %

año	mes	Vesci (Hm3)	Prec. (mm)	Ht	Hv	Ar	Vdi	VolHt	VolHv	ISD Índice de Satisfacción de la Demanda							Aporte total (Hm3)	
				4413.0	4421.8	100.0		0.00	0.29	Aembau	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri		
				Evap. (mm)	Dem. (mm)	Pi-Evi (Hm3)/Há		Vsi (Hm3)	Vemb (Hm3)	(Ha)			(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Hm3)		
2006	8	0.00	10.52	99.52	19.59	-0.0009	0.020	0.001	-0.018	0.00	0.08	-0.018	0.001	0.16	0.000	0.001	0.003	
2006	9	0.01	87.69	112.55	25.65	-0.0002	0.026	0.000	-0.017	0.00	0.08	-0.017	0.001	0.16	0.000	0.008	0.008	
2006	10	0.01	37.12	126.37	0.00	-0.0009	0.000	0.000	0.008	0.86	0.51	0.008	0.008	0.83	0.000	0.000	0.007	
2006	11	0.02	106.22	120.05	0.00	-0.0001	0.000	0.000	0.024	1.70	1.27	0.024	0.024	1.69	0.000	0.000	0.017	
2006	12	0.05	146.49	118.48	35.14	0.0003	0.035	0.004	0.034	2.09	1.89	0.034	0.034	2.10	0.000	0.035	0.049	
2007	1	0.18	261.62	114.59	25.50	0.0015	0.025	0.020	0.171	5.74	3.92	0.175	0.175	5.80	0.000	0.025	0.185	
2007	2	0.32	290.39	99.52	55.78	0.0019	0.056	0.052	0.386	9.52	7.66	0.392	0.294	8.03	0.098	0.056	0.325	
2007	3	0.35	257.04	98.72	78.51	0.0016	0.079	0.053	0.512	11.35	9.69	0.514	0.294	8.03	0.220	0.079	0.352	
2007	4	0.22	128.42	86.76	99.06	0.0004	0.099	0.029	0.385	9.51	8.77	0.382	0.294	8.03	0.088	0.099	0.216	
2007	5	0.11	8.89	84.56	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.297	8.08	8.06	0.287	0.287	7.92	0.000	0.098	0.105	
2007	6	0.05	2.55	75.61	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.247	7.21	7.57	0.240	0.240	7.08	0.000	0.085	0.043	
2007	7	0.02	6.28	80.70	59.49	-0.0008	0.059	0.003	0.200	6.32	6.70	0.194	0.194	6.20	0.000	0.059	0.016	
2007	8	0.01	6.12	94.87	19.59	-0.0009	0.020	0.001	0.183	5.98	6.09	0.178	0.178	5.87	0.000	0.020	0.004	
2007	9	0.00	19.21	94.26	25.65	-0.0008	0.026	0.000	0.156	5.41	5.64	0.152	0.152	5.32	0.000	0.026	0.000	
2007	10	0.00	50.67	114.25	0.00	-0.0006	0.000	0.000	0.154	5.36	5.34	0.150	0.150	5.28	0.000	0.000	-0.001	
2007	11	0.00	76.03	117.48	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.155	5.38	5.33	0.152	0.152	5.33	0.000	0.000	0.002	
2007	12	0.06	175.64	112.39	35.14	0.0006	0.035	0.004	0.173	5.77	5.55	0.175	0.175	5.82	0.000	0.035	0.062	
2008	1	0.19	254.85	105.88	25.50	0.0015	0.025	0.020	0.319	8.46	7.14	0.325	0.294	8.03	0.031	0.025	0.195	
2008	2	0.14	126.1	126.1	98.10	55.78	0.0003	0.056	0.052	0.323	8.51	8.27	0.321	0.294	8.03	0.027	0.056	0.135
2008	3	0.09	94.02	101.60	78.51	-0.0001	0.079	0.053	0.251	7.28	7.65	0.248	0.248	7.22	0.000	0.079	0.086	
2008	4	0.05	6.04	92.95	99.06	-0.0009	0.099	0.029	0.166	5.63	6.43	0.160	0.160	5.49	0.000	0.099	0.040	
2008	5	0.02	0.21	84.83	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.068	3.23	4.36	0.064	0.064	3.11	0.000	0.098	0.016	
2008	6	0.01	0.37	79.33	84.60	-0.0008	0.085	0.006	-0.017	0.00	1.56	-0.018	0.001	0.16	0.000	0.085	0.008	
2008	7	0.00	0.15	90.10	59.49	-0.0009	0.059	0.003	-0.058	0.00	0.08	-0.058	0.001	0.16	0.000	0.059	0.004	
2008	8	0.00	13.78	106.88	19.59	-0.0009	0.020	0.001	-0.018	0.00	0.08	-0.019	0.001	0.16	0.000	0.020	0.002	
2008	9	0.00	23.35	112.96	25.65	-0.0009	0.026	0.000	-0.024	0.00	0.08	-0.025	0.001	0.16	0.000	0.026	0.001	
2008	10	0.01	95.18	123.45	0.00	-0.0003	0.000	0.000	0.010	0.97	0.57	0.010	0.010	0.96	0.000	0.000	0.009	
2008	11	0.01	80.36	128.35	0.00	-0.0005	0.000	0.000	0.024	1.67	1.31	0.023	0.023	1.64	0.000	0.000	0.013	
2008	12	0.10	211.45	119.20	35.14	0.0009	0.035	0.004	0.081	3.58	2.61	0.082	0.082	3.63	0.000	0.035	0.099	
2009	1	0.08	106.53	105.24	25.50	0.0000	0.025	0.020	0.118	4.54	4.08	0.116	0.116	4.51	0.000	0.025	0.080	
2009	2	0.22	280.91	93.06	55.78	0.0019	0.056	0.052	0.232	6.94	5.72	0.238	0.238	7.05	0.000	0.056	0.230	
2009	3	0.12	80.05	100.21	78.51	-0.0002	0.079	0.053	0.230	6.90	6.97	0.226	0.226	6.82	0.000	0.079	0.120	
2009	4	0.06	65.27	85.72	99.06	-0.0002	0.099	0.029	0.162	5.53	6.17	0.159	0.159	5.47	0.000	0.099	0.061	
2009	5	0.03	36.93	83.43	98.36	-0.0005	0.098	0.013	0.077	3.49	4.48	0.075	0.075	3.42	0.000	0.098	0.027	
2009	6	0.01	9.18	81.14	84.60	-0.0007	0.085	0.006	-0.002	0.00	1.71	-0.004	0.001	0.16	0.000	0.085	0.012	
2009	7	0.01	10.72	88.68	59.49	-0.0008	0.059	0.003	-0.056	0.00	0.08	-0.056	0.001	0.16	0.000	0.059	0.006	
2009	8	0.00	14.22	104.91	19.59	-0.0009	0.020	0.001	-0.018	0.00	0.08	-0.018	0.001	0.16	0.000	0.020	0.002	
2009	9	0.00	53.61	113.12	25.65	-0.0006	0.026	0.000	-0.024	0.00	0.08	-0.024	0.001	0.16	0.000	0.026	0.001	
2009	10	0.00	50.06	127.17	0.00	-0.0008	0.000	0.000	0.001	0.29	0.23	0.001	0.001	0.27	0.000	0.000	0.001	
2009	11	0.07	189.09	122.28	0.00	0.0007	0.000	0.000	0.069	3.25	1.76	0.070	0.070	3.27	0.000	0.000	0.069	
2009	12	0.09	144.32	118.54	35.14	0.0003	0.035	0.004	0.117	4.53	3.90	0.117	0.117	4.52	0.000	0.035	0.087	
2010	1	0.11	175.18	106.51	25.50	0.0007	0.025	0.020	0.184	5.99	5.26	0.185	0.185	6.02	0.000	0.025	0.113	
2010	2	0.18	223.67	96.93	55.78	0.0013	0.056	0.052	0.262	7.47	6.75	0.266	0.266	7.54	0.000	0.056	0.188	
2010	3	0.17	164.11	100.98	78.51	0.0006	0.079	0.053	0.303	8.19	7.86	0.303	0.294	8.03	0.009	0.079	0.170	
2010	4	0.11	81.25	90.01	99.06	-0.0001	0.099	0.029	0.272	7.65	7.84	0.268	0.268	7.58	0.000	0.099	0.102	
2010	5	0.05	13.13	84.86	98.36	-0.0007	0.098	0.013	0.209	6.50	7.04	0.203	0.203	6.37	0.000	0.098	0.047	
2010	6	0.02	0	75.64	84.60	-0.0008	0.085	0.006	0.136	4.96	5.67	0.131	0.131	4.85	0.000	0.085	0.019	
2010	7	0.01	0	83.43	59.49	-0.0008	0.059	0.003	0.079	3.54	4.20	0.076	0.076	3.44	0.000	0.059	0.007	
2010	8	0.00	0.1	100.94	19.59	-0.0010	0.020	0.001	0.059	2.96	3.20	0.056	0.056	2.85	0.000	0.020	0.001	
2010	9	0.00	19.16	105.86	25.65	-0.0009	0.026	0.000	0.032	2.02	2.44	0.030	0.030	1.94	0.000	0.026	0.000	
2010	10	0.00	3.1	119.95	0.00	-0.0012	0.000	0.000	0.031	1.97	1.95	0.028	0.028	1.87	0.000	0.000	-0.001	
2010	11	0.00	40.21	124.59	0.00	-0.0008	0.000	0.000	0.029	1.87	1.87	0.027	0.027	1.81	0.000	0.000	-0.001	
2010	12	0.06	185.4	115.54	35.14	0.0007	0.035	0.004	0.052	2.73	2.27	0.053	0.053	2.77	0.000	0.035	0.066	
2011	1	0.18	245.16	113.07	25.50	0.0013	0.025	0.020	0.192	6.15	4.46	0.195	0.195	6.21	0.000	0.025	0.187	
2011	2	0.42	346.51	93.95	55.78	0.0025	0.056	0.052	0.510	11.33	8.77	0.519	0.294	8.03	0.225	0.056	0.432	
2011	3	0.35	231.81	97.17	78.51	0.0013	0.079	0.053	0.511	11.35	9.69	0.512	0.294	8.03	0.218	0.079	0.350	
2011	4	0.26	161.2	86.60	99.06	0.0007	0.099	0.029	0.425	10.11	9.07	0.423	0.294	8.03	0.129	0.099	0.258	
2011	5	0.13	2.7	82.69	98.36	-0.0008	0.098	0.013	0.317	8.42	8.22	0.306	0.294	8.03	0.012	0.098	0.124	
2011	6	0.06	5.27	75.25	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.262	7.48	7.76	0.255	0.255	7.36	0.000	0.085	0.052	
2011	7	0.03	0	79.49	59.49	-0.0008	0.059	0.003	0.219	6.69	7.02	0.213	0.213	6.57	0.000	0.059	0.020	
2011	8	0.01	10.03	92.32	19.59	-0.0008	0.020	0.001	0.203	6.38	6.48	0.198	0.198	6.27	0.000	0.020	0.006	
2011	9	0.00	46.78	97.62	25.65	-0.0005	0.026	0.000	0.177	5.85	6.06	0.174	0.174	5.79	0.000	0.026	0.002	
2011	10	0.00	62.32	110.99	0.00	-0.0005	0.000	0.000	0.177	5.86	5.82	0.174	0.174	5.80	0.000	0.000	0.001	
2011	11	0.03	129.99	113.55	0.00	0.0002	0.000	0.000	0.201	6.33	6.07	0.201	0.201	6.34	0.000	0.000	0.027	
2011	12	0.07	166.47	108.54	35.14	0.0006	0.035	0.004	0.235	6.98	6.66	0.237	0.237	7.01	0.000	0.035	0.075	
2012	1	0.12	190.78	110.41	25.50	0.0008	0.025	0.020	0.313	8.36	7.69	0.316	0.294	8.03	0.022	0.025	0.125	
2012	2	0.30	300.33															

**BALANCE HÍDRICO EN EL EMBALSE ENTRE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA**

Presa Champacocha

		Ht	Hv	Ar	ISD Índice de Satisfacción de la Demanda: <b>84.07 %</b>														
		4413.0	4421.8	100.0	VolHt	VolHv													
															0.00	0.29			
año	mes	Vesci	Prec.	Evap.	Dem.	Pi-Evi	Vdi	Vsi	Vemb	Aemba	Ai	Bi	Vembi	Aembi	Vvi	Vri	Aporte		
		(Hm3)	(mm)	(mm)	(mm)	(Hm3)/Há	(Hm3)	(Hm3)	(Hm3)	(Hm3)	(Ha)			(Hm3)	(Ha)	(Hm3)	(Hm3)	(Hm3)	
2013	6	0.01	8.37	80.57	84.60	-0.0007	0.085	0.006	-0.085	0.00	0.08	-0.085	0.001	0.16	0.000	0.000	0.005		
2013	7	0.00	12.41	85.00	59.49	-0.0007	0.059	0.003	-0.059	0.00	0.08	-0.059	0.001	0.16	0.000	0.000	0.002		
2013	8	0.00	27.4	101.23	19.59	-0.0007	0.020	0.001	-0.019	0.00	0.08	-0.019	0.001	0.16	0.000	0.000	0.001		
2013	9	0.00	62.05	110.53	25.65	-0.0005	0.026	0.000	-0.023	0.00	0.08	-0.023	0.001	0.16	0.000	0.002	0.002		
2013	10	0.00	46.42	121.16	0.00	-0.0007	0.000	0.000	0.002	0.36	0.26	0.002	0.002	0.34	0.000	0.000	0.001		
2013	11	0.01	88.78	127.93	0.00	-0.0004	0.000	0.000	0.009	0.93	0.64	0.009	0.009	0.91	0.000	0.000	0.007		
2013	12	0.03	125.07	121.31	35.14	0.0000	0.035	0.004	-0.001	0.00	0.46	-0.001	0.001	0.16	0.000	0.034	0.030		
2014	1	0.10	194.42	116.88	25.50	0.0008	0.025	0.020	0.053	2.75	1.46	0.053	0.053	2.77	0.000	0.025	0.098		
2014	2	0.16	203.45	97.68	55.78	0.0011	0.056	0.052	0.105	4.24	3.51	0.107	0.107	4.28	0.000	0.056	0.162		
2014	3	0.32	285.77	98.08	78.51	0.0019	0.079	0.053	0.291	7.99	6.13	0.295	0.294	8.03	0.002	0.079	0.320		
2014	4	0.16	67.09	88.98	99.06	-0.0002	0.099	0.029	0.322	8.50	8.26	0.315	0.294	8.03	0.021	0.099	0.150		
2014	5	0.07	24.17	83.16	98.36	-0.0006	0.098	0.013	0.257	7.38	7.71	0.250	0.250	7.26	0.000	0.098	0.068		
2014	6	0.03	5.08	75.77	84.60	-0.0007	0.085	0.006	0.192	6.17	6.72	0.187	0.187	6.06	0.000	0.085	0.027		
2014	7	0.01	8.07	79.19	59.49	-0.0007	0.059	0.003	0.139	5.04	5.55	0.135	0.135	4.94	0.000	0.059	0.010		
2014	8	0.01	20.57	90.98	19.59	-0.0007	0.020	0.001	0.120	4.60	4.77	0.117	0.117	4.52	0.000	0.020	0.003		



Variación de Niveles en el Embalse

					Volúmenes de déficit, entregados, y vertidos.		
año	mes i	Nivel de Embalse	Nivel de Emb. (%)	Volumen disp. (%)	Déficit Vri-Vdi	Vol entreg. para riego Vri	Volumen vertido Vvi
1982	9	4419.5					
1982	10	4420.4					
1982	11	4421.3					
1982	12	4421.1					
1983	1	4421.5					
1983	2	4421.2					
1983	3	4420.3					
1983	4	4419.0					
1983	5	4416.9					
1983	6	4415.0					
1983	7	4415.0					
1983	8	4415.0					
1983	9	4415.0					
1983	10	4415.4					
1983	11	4415.5					
1983	12	4417.5					
1984	1	4418.5					
1984	2	4421.8					
1984	3	4421.8					
1984	4	4421.8					
1984	5	4421.7					
1984	6	4421.0					
1984	7	4420.2					
1984	8	4419.9					
1984	9	4419.4					
1984	10	4419.3					
1984	11	4420.5					
1984	12	4421.8					
1985	1	4421.8					
1985	2	4421.1					
1985	3	4419.8					
1985	4	4418.4					
1985	5	4416.3					
1985	6	4415.0					
1985	7	4415.0					
1985	8	4415.0					
1985	9	4415.0					
1985	10	4415.3					
1985	11	4415.3					
1985	12	4415.4					
1986	1	4420.2					
1986	2	4421.8					
1986	3	4421.8					
1986	4	4421.8					
1986	5	4421.1					
1986	6	4420.0					
1986	7	4418.9					
1986	8	4418.4					
1986	9	4418.0					
1986	10	4418.2					
1986	11	4418.2					
1986	12	4417.1					
1987	1	4418.9					
1987	2	4421.3					
1987	3	4421.1					
1987	4	4419.9					
1987	5	4417.9					
1987	6	4415.2					
1987	7	4415.0					
1987	8	4415.0					
1987	9	4415.0					
1987	10	4415.0					
1987	11	4415.1					
1987	12	4415.0					
1988	1	4416.2					
1988	2	4420.2					
1988	3	4420.3					
1988	4	4419.2					
1988	5	4417.2					
1988	6	4415.0					

año	mes i	Nivel de Embalse	Nivel de Emb. (%)	Volumen disp. (%)	Déficit Vri-Vdi	Vol entreg. para riego Vri	Volumen vertido Vvi
1988	7	4415.0					
1988	8	4415.0					
1988	9	4415.0					
1988	10	4415.0					
1988	11	4415.0					
1988	12	4415.0					
1989	1	4416.2					
1989	2	4415.3					
1989	3	4417.3					
1989	4	4417.4					
1989	5	4416.0					
1989	6	4415.0					
1989	7	4415.0					
1989	8	4415.0					
1989	9	4415.0					
1989	10	4415.0					
1989	11	4415.0					
1989	12	4415.0					
1990	1	4415.9					
1990	2	4415.0					
1990	3	4415.0					
1990	4	4415.0					
1990	5	4415.0					
1990	6	4415.0					
1990	7	4415.0					
1990	8	4415.0					
1990	9	4415.0					
1990	10	4415.5					
1990	11	4418.2					
1990	12	4419.3					
1991	1	4420.9					
1991	2	4421.8					
1991	3	4421.8					
1991	4	4420.8					
1991	5	4419.3					
1991	6	4417.2					
1991	7	4415.1					
1991	8	4415.0					
1991	9	4415.0					
1991	10	4415.1					
1991	11	4415.0					
1991	12	4415.0					
1992	1	4415.0					
1992	2	4417.3					
1992	3	4416.9					
1992	4	4415.0					
1992	5	4415.0					
1992	6	4415.0					
1992	7	4415.0					
1992	8	4415.0					
1992	9	4415.0					
1992	10	4415.1					
1992	11	4415.5					
1992	12	4415.0					
1993	1	4421.6					
1993	2	4421.8					
1993	3	4421.8					
1993	4	4421.8					
1993	5	4421.8					
1993	6	4421.3					
1993	7	4420.7					
1993	8	4420.5					
1993	9	4420.4					
1993	10	4421.2					
1993	11	4421.8					
1993	12	4421.8					
1994	1	4421.8					
1994	2	4421.8					
1994	3	4421.8					
1994	4	4421.6					
1994	5	4420.7					
1994	6	4419.4					
1994	7	4418.2					

año	mes i	Nivel de Embalse	Nivel de Emb. (%)	Volumen disp. (%)	Déficit Vri-Vdi	Vol entreg. para riego Vri	Volumen vertido Vvi
1994	8	4417.7					
1994	9	4417.8					
1994	10	4418.3					
1994	11	4419.4					
1994	12	4419.3					
1995	1	4420.0					
1995	2	4421.4					
1995	3	4421.8					
1995	4	4421.8					
1995	5	4421.2					
1995	6	4420.2					
1995	7	4419.1					
1995	8	4418.7					
1995	9	4418.0					
1995	10	4418.0					
1995	11	4418.2					
1995	12	4417.4					
1996	1	4420.4					
1996	2	4421.8					
1996	3	4421.8					
1996	4	4421.6					
1996	5	4420.6					
1996	6	4419.2					
1996	7	4417.9					
1996	8	4417.3					
1996	9	4416.5					
1996	10	4416.4					
1996	11	4416.7					
1996	12	4416.4					
1997	1	4419.0					
1997	2	4419.6					
1997	3	4420.1					
1997	4	4419.3					
1997	5	4417.4					
1997	6	4415.0					
1997	7	4415.0					
1997	8	4415.0					
1997	9	4415.0					
1997	10	4415.3					
1997	11	4415.8					
1997	12	4415.5					
1998	1	4417.5					
1998	2	4418.7					
1998	3	4418.5					
1998	4	4416.8					
1998	5	4415.0					
1998	6	4415.0					
1998	7	4415.0					
1998	8	4415.0					
1998	9	4415.0					
1998	10	4415.0					
1998	11	4415.0					
1998	12	4415.0					
1999	1	4415.0					
1999	2	4420.1					
1999	3	4421.8					
1999	4	4421.8					
1999	5	4421.7					
1999	6	4421.0					
1999	7	4420.2					
1999	8	4419.9					
1999	9	4419.4					
1999	10	4419.6					
1999	11	4419.9					
1999	12	4421.8					
2000	1	4421.8					
2000	2	4421.8					
2000	3	4421.8					
2000	4	4421.8					
2000	5	4421.3					
2000	6	4420.3					
2000	7	4419.4					
2000	8	4419.0					

año	mes i	Nivel de Embalse	Nivel de Emb. (%)	Volumen disp. (%)	Déficit Vri-Vdi	Vol entreg. para riego Vri	Volumen vertido Vvi
2000	9	4418.4					
2000	10	4419.4					
2000	11	4420.0					
2000	12	4420.0					
2001	1	4421.2					
2001	2	4421.0					
2001	3	4420.7					
2001	4	4419.5					
2001	5	4417.4					
2001	6	4415.0					
2001	7	4415.0					
2001	8	4415.0					
2001	9	4415.0					
2001	10	4415.4					
2001	11	4415.8					
2001	12	4415.4					
2002	1	4415.0					
2002	2	4418.0					
2002	3	4419.9					
2002	4	4420.0					
2002	5	4419.2					
2002	6	4417.7					
2002	7	4416.1					
2002	8	4415.5					
2002	9	4415.0					
2002	10	4415.1					
2002	11	4415.3					
2002	12	4415.0					
2003	1	4415.0					
2003	2	4417.7					
2003	3	4420.0					
2003	4	4419.9					
2003	5	4418.8					
2003	6	4417.0					
2003	7	4415.1					
2003	8	4415.0					
2003	9	4415.0					
2003	10	4415.0					
2003	11	4415.0					
2003	12	4416.1					
2004	1	4417.3					
2004	2	4420.9					
2004	3	4421.8					
2004	4	4421.8					
2004	5	4421.1					
2004	6	4420.0					
2004	7	4418.9					
2004	8	4418.5					
2004	9	4418.8					
2004	10	4419.5					
2004	11	4419.9					
2004	12	4421.4					
2005	1	4421.8					
2005	2	4421.0					
2005	3	4421.6					
2005	4	4420.9					
2005	5	4419.5					
2005	6	4417.6					
2005	7	4415.7					
2005	8	4415.0					
2005	9	4415.0					
2005	10	4415.0					
2005	11	4415.0					
2005	12	4415.0					
2006	1	4415.0					
2006	2	4415.0					
2006	3	4415.0					
2006	4	4415.0					
2006	5	4415.0					
2006	6	4415.0					
2006	7	4415.0					
2006	8	4415.0					
2006	9	4415.0					

año	mes i	Nivel de Embalse	Nivel de Emb. (%)	Volumen disp. (%)	Déficit Vri-Vdi	Vol entreg. para riego Vri	Volumen vertido Vvi
2006	10	4415.3					
2006	11	4415.9					
2006	12	4416.3					
2007	1	4419.9					
2007	2	4421.8					
2007	3	4421.8					
2007	4	4421.8					
2007	5	4421.7					
2007	6	4421.0					
2007	7	4420.2					
2007	8	4419.9					
2007	9	4419.3					
2007	10	4419.3					
2007	11	4419.4					
2007	12	4419.8					
2008	1	4421.8					
2008	2	4421.8					
2008	3	4421.1					
2008	4	4419.4					
2008	5	4417.0					
2008	6	4415.0					
2008	7	4415.0					
2008	8	4415.0					
2008	9	4415.0					
2008	10	4415.4					
2008	11	4415.9					
2008	12	4417.8					
2009	1	4418.7					
2009	2	4421.1					
2009	3	4420.9					
2009	4	4419.6					
2009	5	4417.6					
2009	6	4415.0					
2009	7	4415.0					
2009	8	4415.0					
2009	9	4415.0					
2009	10	4415.0					
2009	11	4417.5					
2009	12	4418.7					
2010	1	4420.2					
2010	2	4421.5					
2010	3	4421.8					
2010	4	4421.4					
2010	5	4420.3					
2010	6	4418.8					
2010	7	4417.4					
2010	8	4416.8					
2010	9	4415.8					
2010	10	4415.7					
2010	11	4415.6					
2010	12	4416.6					
2011	1	4420.1					
2011	2	4421.8					
2011	3	4421.8					
2011	4	4421.8					
2011	5	4421.8					
2011	6	4421.2					
2011	7	4420.5					
2011	8	4420.2					
2011	9	4419.8					
2011	10	4419.8					
2011	11	4420.3					
2011	12	4420.9					
2012	1	4421.8					
2012	2	4421.8					
2012	3	4421.8					
2012	4	4421.8					
2012	5	4421.1					
2012	6	4420.0					
2012	7	4418.9					
2012	8	4418.5					

año	mes i	Nivel de Embalse	Nivel de Emb. (%)	Volumen disp. (%)	Déficit Vri-Vdi	Vol entreg. para riego Vri	Volumen vertido Vvi
2012	9	4417.9					
2012	10	4417.9					
2012	11	4417.8					
2012	12	4418.8					
2013	1	4419.2					
2013	2	4419.0					
2013	3	4417.1					
2013	4	4415.0					
2013	5	4415.0					
2013	6	4415.0					
2013	7	4415.0					
2013	8	4415.0					
2013	9	4415.0					
2013	10	4415.0					
2013	11	4415.3					
2013	12	4415.0					
2014	1	4417.0					
2014	2	4418.5					
2014	3	4421.8					
2014	4	4421.8					
2014	5	4421.1					
2014	6	4420.0					
2014	7	4418.9					
2014	8	4418.5					

