

## **1.1. SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DEL TEMA DEL PROYECTO.**

### **Título del Proyecto:**

**“Determinación de pérdidas en reservorios de agua de lluvia: sin impermeabilización, con impermeabilización de geo-membrana, hormigón ciclópeo, arcilla compactada y su costo unitario”.**

Se definió trabajar con este tema, porque se observó que varias familias de las comunidades de nuestro departamento cuentan ya con reservorios de agua, ya sean construidos con recursos del PERT, el FPS o haciendo uso del PROSOL, algunos de ellos son revestidos con distintos materiales en tanto que la mayoría no cuentan con ningún tipo de revestimiento, en estas condiciones estos reservorios sufren considerables pérdidas, siendo la más importante la pérdida por infiltración, lo cual es una contrariedad porque en algunos casos toda el agua almacenada se pierde antes de poder ser utilizada en la época de estiaje, ya sea para micro riego o simplemente para el consumo del ganado sobre todo caprino que es uno de los ingresos con que cuentan los comunarios asentados en las áreas rurales.

Las condiciones climatológicas son variables en la región, las lluvias se concentran entre los meses de diciembre a marzo y se caracterizan por su alta intensidad y corta duración; por consiguiente el periodo seco oscila entre 7 y 8 meses del año. A esto se suma las condiciones topográficas de la región donde predominan fuertes elevaciones o montañas con depresiones en donde habitan una considerable población dedicada al agro en pequeña escala cultivadas a temporal, que en su mayoría sólo es para su consumo, a esto se suma como medio de vida la crianza de ganado vacuno y sobre todo caprino. Que debido a las exigencias de la naturaleza tanto los habitantes de lugar como el ganado debe caminar distancias considerables en busca del líquido elemento, que también es escaso ya que las pocas fuentes de agua en sus cabeceras son captadas ya sea para riego o para el consumo de algunas poblaciones con mayor densidad, empeorando su subsistencia y como respuesta a la misma sin mayores alternativas, emigran a la ciudad.

Por estas razones se plantea este tema con el fin de poder determinar cuál es el material con mayor eficiencia que generará menores pérdidas por infiltración a un precio relativamente bajo, para poder recubrir los reservorios de agua.

Además, este trabajo está dirigido a la contribución en varias ramas de la ingeniería, particularmente la ingeniería hidráulica y la ingeniería de mecánica de suelos, y busca analizar y determinar las pérdidas por infiltración en reservorios de agua de lluvia que se encuentran recubiertos con distintos materiales y su costo unitario, logrando de esta manera generar pautas que con futuras investigaciones logren la implementación de otros materiales con mayores eficiencias y menores costos.

## 1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO.

El desarrollo de este proyecto se llevará a cabo en la comunidad de San Agustín Norte perteneciente a la cuenca del Río Santa Ana, Provincia Cercado del Departamento de Tarija - Bolivia, la figura 1.2 muestra la ubicación de la zona en estudio en relación a la ciudad de Tarija.

Se eligió trabajar en la comunidad de San Agustín Norte, la misma que se encuentra en las coordenadas Geográficas  $21^{\circ}30'29.20''S$   $64^{\circ}31'23.36''O$  y UTM 20 K 342228.60 m E 7620847.70 m S; debido a que es una zona en donde se puede encontrar reservorios de agua de lluvia revestidos con distintos materiales tales como: geo-membrana, hormigón ciclópeo y la gran mayoría sin revestimiento, lo cual es necesario para que ciertas variables hidrológicas y meteorológicas puedan ser consideradas como constantes (radiación solar, velocidad del viento, etc.).



**Figura 1.1.- Ubicación de la región donde se encuentra el estudio.**



**Figura 1.2.- Ubicación de la zona de estudio en relación a la ciudad de Tarija.**

### **1.3. EL PROBLEMA.**

#### **1.3.1. Planteamiento.**

En el diseño de reservorios de agua, la mayor dificultad reside en la elección del material de recubrimiento, el cual debe ser capaz de disminuir al máximo las pérdidas por infiltración y tener un costo accesible para sus propietarios.

La mayor parte de las veces los recursos son limitados al tratarse de familias asentadas en regiones montañosas con ingresos económicos basados en una agricultura a temporal en pequeñas parcelas y la crianza de ganado menor, por lo que para el recubrimiento de estos reservorios se busca el material más económico el mismo que debe ser en lo posible de la zona, que para nuestro propósito vendría a ser de arcilla compactada, que muy a pesar de haber reservorios construidos con este material no han tenido los resultados esperados, ya que no han seguido ningún tipo de control tecnológico, sumado a la utilización del material producto de las excavaciones laterales del lugar de implantación de los mismos sin ningún cuidado de selección y control de compactación, a esto se suma una mala ubicación donde la mayoría de las veces están implantados en sectores con fuertes escorrentías superficiales o en los propios cauces, bajo estas condiciones no es posible siquiera imaginar que la

construcción tome en cuenta las pérdidas reales por infiltración, que en algunos casos llegan a ser tan grandes que el agua se pierde completamente antes de poder ser utilizada ya sea con fines de riego u otros.

Para lograr la mayor retención de agua en los reservorios, se tienen que disminuir las pérdidas por filtraciones en la base y pie de terraplenes. No obstante, en algunos casos existen filtraciones debido a las condiciones del suelo permeable y su bajo grado de compactación en su etapa de construcción inicial, el mismo que se ira consolidando con el pasar del tiempo (aproximadamente 2 años, que está en función al tipo de suelo). Mientras exista un predominio en el porcentaje de arena y limo en la base y los terraplenes, el riesgo de filtraciones será mayor ya que estos tipos de suelos no cuentan con propiedades impermeables.

### **1.3.2. Formulación.**

*El proyecto: ¿responde a las necesidades de la comunidad, de la ciencia, de la institución, y/o del investigador?*

Sí, en relación a la comunidad (refiriéndose más que todo a la comunidad de la zona donde se realizará el presente estudio), el proyecto se constituye en una alternativa a la necesidad de contar con bases sólidas al momento de realizar la selección de un material para ser usado en el recubrimiento de Reservorios de Agua.

En cuanto a la institución (en este caso nuestra Universidad), mediante este proyecto se plasma una de las metas y objetivos fundamentales de la misma, pues se contribuye de manera directa al ejercicio de la profesión de los Ingenieros Civiles, por medio de un proyecto de investigación claro y concreto. Además de cumplir con uno de los objetivos fundamentales de la institución como es el de la investigación.

### **1.3.3. Sistematización.**

Para aprovechar de manera adecuada el agua almacenada en los reservorios, estos deben estar revestidos con algún material, en donde se identifica la necesidad de realizar un análisis de las pérdidas (infiltración y evaporación) y su costo unitario que tendrán los distintos materiales a ser utilizados con este fin, para lo cual es necesario:

- Analizar las variables que involucran las pérdidas en los reservorios.
  - Infiltración
  - Evaporación
- Analizar las variables que intervienen en la construcción:
  - Grado de Compactación.
  - Propiedades mecánicas del suelo
- Difundir los resultados con sus recomendaciones constructivas.

## **1.4. OBJETIVOS.**

### **1.4.1. Objetivo general.**

- Cuantificar las pérdidas en reservorios de agua de lluvia sin impermeabilización, con impermeabilización de distintos materiales y su costo.

### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- Análisis del comportamiento de las variables: volumen de almacenamiento y las pérdidas.
- Establecer la influencia del tipo de material con el que será recubierto el reservorio, en el volumen de almacenamiento total, cuando estos se encuentran en proceso de diseño.
- Comparar los resultados obtenidos para los distintos materiales usados para recubrir los reservorios y determinar el de mayor eficiencia y menor costo.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN.**

### **1.5.1. Académica.**

La investigación propuesta busca mediante mediciones realizadas a distintos reservorios de agua, establecer el comportamiento de las pérdidas por infiltración y evaporación en dichas estructuras, y de esta manera, realizar una correcta selección del material a utilizar para impermeabilizar un reservorio. Logrando así optimizar dichas estructuras mediante la reducción de las pérdidas (infiltración) a un menor costo.

### **1.5.2. Técnica.**

Los reservorios de agua son en muchos casos la única solución para las familias que viven en zonas altas, esto debido a que no se puede construir otro tipo de obras como ser presas de almacenamiento en estas zonas, por lo que la correcta selección del material para la impermeabilización es determinante para que el agua almacenada no se pierda antes de poder ser utilizada, ya sea con fines de riego en pequeña escala ó para consumo del ganado menor.

### **1.5.3. Social.**

Como se mencionó anteriormente, los reservorios en muchos casos son la única alternativa para las familias que viven en zonas altas donde ni siquiera se cuenta con caminos de acceso, en consecuencia el agua almacenada en los reservorios llegaría a ser la única fuente de abastecimiento para el riego en pequeña escala y para el consumo del ganado menor, mejorando las condiciones de vida de los comunarios y evitando la migración a los centros poblados, abandonando su lugar de origen para engrosar las filas de desocupados.

### **1.5.4. Institucional.**

En cuanto a la institución (en este caso nuestra Universidad), mediante el presente proyecto se plasma una de las metas y objetivos fundamentales de la Universidad, pues se contribuye de manera directa al ejercicio de la profesión, por medio de un proyecto de investigación claro y concreto, que además beneficiará a los comunarios, en particular a los que viven en las zonas altas de nuestro departamento.

## **MARCO DE REFERENCIA.**

### **1.5.5. Teórico.**

Determinación de pérdidas por evaporación e infiltración en reservorios de agua.

#### **Evaporación.**

La evaporación es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la

tensión superficial. A diferencia de la ebullición, la evaporación se puede producir a cualquier temperatura, siendo más rápido cuanto más elevada aquella. No es necesario que toda la masa alcance el punto de ebullición. Cuando existe un espacio libre encima de un líquido, una parte de sus moléculas está en forma gaseosa, al equilibrarse, la cantidad de materia gaseosa define la presión de vapor saturante, la cual no depende del volumen; pero varía según la naturaleza del líquido y la temperatura. Si la cantidad de gas es inferior a la presión de vapor saturante, una parte de las moléculas pasan de la fase líquida a la gaseosa: eso es la evaporación. Cuando la presión de vapor iguala a la atmosférica, se produce la ebullición.

En hidrología, la evaporación es una de las variables hidrológicas importantes al momento de establecer el balance hídrico de una determinada cuenca hidrográfica o parte de esta. En este caso, se debe distinguir entre la evaporación desde superficies libres y la evaporación desde el suelo. La evaporación de agua es importante e indispensable en la vida, ya que el vapor de agua, al condensarse se transforma en nubes y vuelve en forma de lluvia, nieve, niebla o rocío.

La evaporación se mide de dos maneras:

- a) Con evaporímetros de sombra o “Piché”.
- b) Evaporación del tanque.

La primera fue por mucho tiempo la forma regular de medir la evaporación pero ya está en desuso. Por su parte los tanques de evaporación tipo A, como el que se muestra en la Figura 1.3, fueron muy utilizados desde los años 60. Las mediciones del tanque A, representan la mejor forma de medir la evaporación.



**FIGURA. 1.3.- Tanque evaporímetro.**

### **Infiltración.**

La Infiltración es un elemento importante del ciclo hidrológico interviniente en muchos problemas de evaluación, planificación y diseños de ingeniería. Se define a la infiltración como al proceso hidrológico por el cual el agua ingresa al suelo a través de su superficie.

La superficie a través de la cual se produce el proceso de ingreso del agua al suelo puede ser:

- La superficie del suelo en terreno natural no inundado.
- El lecho de un río o cauce natural o artificial.
- El fondo de una laguna o estero.
- Cualquier otro tipo de interface suelo-agua por donde pueda producirse este proceso.

A través de lo expresado surge claramente la interacción de dos elementos: al agua que es la que sufre el proceso de infiltración y el suelo, el cual se transforma en el receptor de dicha infiltración (en forma temporal o permanente). El agua que da origen a la infiltración puede provenir de fenómenos naturales (lluvia, agua de depresiones, de cursos de aguas, etc.) o artificial (riego agrícola).

La infiltración es otra variable de gran importancia en hidrología. Su medición se realiza de varias formas, dependiendo del uso que se pretenda dar a la información, como los aforos no se pueden realizar a cada momento, para tener un registro de caudales, es necesario medir los niveles mediante la instalación de miras o limnímetros y luego esos niveles son

transformados a gasto mediante el uso de las curvas de calibración. Cuando se quiere tener un registro continuo, es necesario utilizar limnógrafos para registrar las alturas de mira de forma gráfica o digital.

Las miras se utilizan para realizar lecturas periódicas y comprobar las lecturas del limnógrafo.

#### **1.5.6. Conceptual.**

Para el presente trabajo se considera necesario definir los siguientes conceptos:

***Reservorio de Agua:*** Un área natural o artificial sostenida y usada para almacenar agua.

***Infiltración:*** La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra se penetra al suelo.

***Evaporación:*** Es un proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

***Método Empírico:*** Un método empírico es aquel que es producto del conocimiento empírico y está basado en la experiencia y, en último término en la percepción, pues nos dice qué es lo que existe y cuáles son sus características, pero no nos dice que algo deba ser necesariamente así y no de otra forma; tampoco nos da verdadera universalidad. Consiste en todo lo que se sabe y que es repetido continuamente sin tener un conocimiento científico.

#### **1.5.7. Espacial**

La base informativa para desarrollar el presente trabajo, será recabada de los reservorios ya construidos en la comunidad de San Agustín Norte, en tanto que la información que necesite ser procesada (análisis de suelos) y determinada se realizara en los laboratorios de suelos de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, para finalmente argumentar y compaginar toda la información.

#### **1.5.8. Temporal.**

La recopilación de la información de campo, al tratarse de un control y registro de las pérdidas (infiltración y evaporación) de agua en los reservorios, se ajustan al periodo seco (mayo a noviembre), el mismo que con fines de recopilación de la información se realizará en el periodo de 3 meses. En tanto que el trabajo final será desarrollado en un periodo de 4 meses.

## **1.6.HIPÓTESIS.**

### **1.6.1. De primer grado.**

**Hipótesis I:** De las experiencias de los profesionales se deduce que la forma más económica de impermeabilizar reservorios de agua es la de compactar la arcilla; pero, ésta tiene considerables pérdidas por infiltración. Entonces la primera hipótesis planteada será que *“la arcilla compactada no logra impermeabilizar los Reservorios de Agua completamente, o es que la construcción no tiene el control tecnológico adecuado u en su defecto los materiales utilizados no son los apropiados”*.

### **1.6.2. De segundo grado.**

**Hipótesis II:** Por lo general los reservorios revestidos con geo-membrana no sufrirán pérdidas por infiltración; pero, este material tiene un costo elevado, por consiguiente es considerado como una alternativa referencial que no se ajusta a las condiciones económicas de los beneficiarios. La segunda hipótesis entonces será que *“los Reservorios recubiertos con geo-membrana al tener menores pérdidas por infiltración serán la única alternativa a pesar de tener un costo elevado, en comparación con otros materiales que también son usados con el mismo objetivo”*.

**Hipótesis III:** Basados en la hipótesis II se supone que un reservorio recubierto con geo-membrana sólo sufrirá pérdidas por evaporación, en donde muchas veces no se le da la importancia respectiva por considerarse pequeña. La tercera y última hipótesis será entonces que, *“las pérdidas por evaporación tienen un valor similar a las pérdidas por infiltración”*.

## **2.1 INTRODUCCIÓN**

Un atajado es un reservorio artificial excavado en suelo natural con equipo pesado (tractor a orugas) y emplazado en laderas con ligera pendiente, que almacena agua en el periodo de lluvias proveniente de la escorrentía superficial y esta es utilizada para diferentes usos (riego, pecuario, doméstico, etc.) durante la época de estiaje. (VILLEGAS, Eduardo, VILLEGAS, Álvaro, Un Atajado como concepto, Entrevista, PGRSAP -GTZ, San Pedro de Buena Vista – Potosí, 2006).

En los últimos años la demanda de agua en áreas áridas y semiáridas se ha incrementado considerablemente. En cierta época del año la intensidad de la precipitación en estas áreas es elevada y supera la capacidad de infiltración del suelo. Esto significa que mucha agua escurra sin poder ser aprovechada, sea para la producción agropecuaria, sea para el consumo humano. Los reservorios pueden ser una alternativa buena y económica, frente a represas grades o en combinación con ellas, a fin de captar esta agua y utilizarla de manera eficiente.

Además, en muchos casos, la intercepción del agua mediante los canales de captación y aducción hacia los reservorios, coadyuva a reducir la erosión hídrica.

Existen diferentes reservorios basados en distintos conceptos que pueden servir perfectamente para almacenar agua. En la presente investigación se presenta solo un tipo con la forma de un tronco de pirámide invertida, excavado en tierra con una capacidad de 500 hasta 3000 m<sup>3</sup>.

## **2.2 PROPIEDAD, DERECHOS DE TIERRA Y AGUA.**

En los capítulos siguientes se tratarán temas más específicos sobre la ubicación, los derechos de propiedad de la tierra son determinantes para el funcionamiento final de un atajado o un sistema de atajados y tienen que ser conocidos; antes del inicio de la construcción, a fin de evitar problemas durante la construcción y el uso posterior.

Además, se tienen que conocer los derechos de propiedad o uso de la tierra del área de aporte, a fin de asegurar la captación de agua y de evitar problemas en la conducción del agua mediante los canales de conducción.

En una situación donde se intercepta la escorrentía del agua de lluvia mediante canales de captación que bordean el cerro, generalmente los derechos de agua se encuentran vinculados con los derechos de la tierra, pero en situaciones, donde se utiliza agua de ríos, acequias, vertientes u otras fuentes, se tendrá que determinar los derechos de agua en diálogo con los demás usuarios, la comunidad, autoridades locales o nacionales antes de iniciar la construcción.

### **2.3 UBICACIÓN.**

La ubicación de un atajado es importante para un funcionamiento apropiado- para la construcción de un atajado, hay que tomar en cuenta la ubicación del área de aporte y del área servida antes de tomar una decisión respecto al lugar de construcción, se recomienda hacer un estudio junto con el o los usuarios sobre las diferentes opciones.

A fin de garantizar el almacenamiento de agua, es importante que el material de construcción tenga una baja capacidad de infiltración. Habrá que buscar un equilibrio entre la capacidad de almacenamiento del atajado, el tamaño y las características del área de aporte, y las lluvias en el área. Además, el agua de escurrimiento tendrá que contener una baja carga de sedimento a fin de evitar la sedimentación del atajado.

De ser posible se evitar construir atajados de poca profundidad y con espejos de agua relativamente extensos, a fin de evitar las pérdidas por evaporación.

Desde el punto de vista económico, conviene construir un atajado en un lugar donde menos movimiento de tierra sea necesario para obtener una capacidad de almacenamiento máxima, como por ejemplo, en una depresión natural cerca del área a ser regada o del abrevadero para los animales.

El atajado tiene que ser ubicado de tal manera que en caso de colapso no haya peligro para los seres vivientes o para la infraestructura circundante.

### **2.3.1 Topografía**

Los atajados pueden ser construidos en terrenos de variada pendiente, la más adecuada es la comprendida entre el 4 y el 15%.

En terrenos con pendientes mayores se necesita mayor movimiento de tierra para lograr la misma capacidad de almacenamiento, de manera que vale la pena buscar un lugar estratégico en la pendiente, como por ejemplo, una depresión natural.

No se aconseja la implementación de atajados en pendientes con una inclinación mayor del 15%, debido a la inestabilidad del terraplén cuesta abajo.

La capacidad del atajado tiene relación con el rango de pendientes recomendados para su construcción, cuanto más inclinado el terreno, menor es la capacidad del atajado que se puede construir garantizando su estabilidad.

### **2.3.1 Características del suelo**

Las características del suelo son determinantes para el éxito de los atajados, tanto para la estabilidad de los terraplenes como para la impermeabilidad.

En términos generales, se puede decir que los suelos con un elevado contenido de arcilla caolinita son los más aptos para la construcción de atajados.

Se debe evitar la construcción en suelos arenosos, rocosos, porosos, o suelos con fenómenos como tubificación y/o con un elevado contenido de cal o sal.

Antes de iniciar la construcción se debe conocer las características del suelo, tanto de la capa arable como del subsuelo. En áreas con suelos heterogéneos se recomienda excavar calicatas en cada lugar previsto para la implementación de atajados, a fin de analizar la aptitud del suelo y de esta manera evitar problemas durante la construcción y el almacenamiento de agua posterior.

Un método sencillo e indicativo para conocer la aptitud es echando un barril de agua en la calicata y observar la filtración del agua. Si el agua se infiltra rápido en el suelo, se necesitará un análisis más profundo.

## **2.4 LA FUENTE DE AGUA**

La forma más común para captar agua en un atajado, en zonas áridas y semiáridas, es interceptando el agua de lluvia que escurre superficialmente mediante canales de captación que bordeen las laderas de un cerro. Pero, también existen muchas otras fuentes de agua

para los atajados como ríos, acequias, vertientes, quebradas y cunetas o combinaciones de estas fuentes. De manera general se pueden diferenciar tres grupos de fuentes de agua:

- Escorrentía de agua pluvial de un área de aporte.
- Ríos, acequias, quebradas y cunetas.
- Vertientes.

En muchos casos es recomendable asegurar la captación de aguas utilizando simultáneamente diferentes fuentes como por ejemplo, mediante la conexión de canales de captación que bordean los cerros con una quebrada o una vertiente.

El tipo de fuente determina los criterios del diseño, de los canales de captación, del sedimentador y del canal de ingreso al atajado. Así, en zonas con precipitaciones torrenciales, donde la fuente de agua es la escorrentía superficial, el caudal de escorrentía es muy variable con picos elevados. En estos casos los canales y el sedimentador tendrán que ser diseñados con una capacidad que permita transportar un caudal grande o incluir obras para regular el flujo. Cuando se trata de una vertiente con aducción constante, los canales y el sedimentador son diseñados con relación al caudal máximo de la vertiente.

#### **2.4.1 Escorrentía superficial**

El volumen de escorrentía de agua pluvial en un área de aporte depende de varios factores. Estos factores pueden ser clasificados de acuerdo a otros procesos: la precipitación y la escorrentía.

En cuanto a la precipitación, no sólo es importante la cantidad, sino también la intensidad de la lluvia. Un chubasco breve e intensivo resulta en un mayor volumen de escorrentía, que una lluvia de la misma cantidad de precipitación, pero por un período más largo.

En cuanto a la escorrentía influyen factores como la topografía, la vegetación y la capacidad de infiltración en el suelo.

Para estimar los valores de estos procesos hay varios métodos empíricos, desde métodos muy sencillos que requieren pocos datos de insumo, hasta métodos más

avanzados que parten de mayor cantidad de datos más precisos. La exactitud del resultado de estos métodos depende mucho de la precisión de los datos recopilados.

Lo importante en todos estos métodos empíricos es que se basan en las características de un área específica donde el método ha sido desarrollado. Por lo tanto, hay que tener mucho cuidado al aplicarlos en otras áreas donde los coeficientes tienen que ser representativos de acuerdo al área de aplicación.

En muchas áreas rurales, en países en vías de desarrollo, donde se implementan atajados, se dispondrá de pocos datos, y menos aún, de datos exactos sobre precipitación, intensidades de la precipitación y escorrentía.

Por lo tanto, un método adecuado para determinar el volumen de escorrentía es el que relacione la superficie con la precipitación mensual o anual y un coeficiente de escurrimiento.

En el caso de fórmulas empíricas, e inclusive en la fórmula de escurrimiento, por lo general, habrá que comprobar los resultados con las experiencias obtenidas en la zona.

#### **Coefficiente de escorrentía (C)**

En caso de que existiesen coeficientes de escorrentía de una situación comparable en la cercanía, éstos pueden ser utilizados para determinar el volumen escurrido. De no existir datos ni referencia se puede hacer uso de la tabla de indicaciones.

Topografía y vegetación	Textura de suelos		
	Franco arenoso	Franco arcilloso y Franco limoso	Arcilloso
<b>Bosque</b>			
Plano 0-5% pendiente	0.10	0.30	0.40
Ondulado 5-10% pendiente	0.25	0.35	0.50
Montañoso 10-30% pendiente	0.30	0.50	0.60
<b>Pasto</b>			
Plano 0-5% pendiente	0.10	0.30	0.40
Ondulado 5-10% pendiente	0.16	0.36	0.55
Montañoso 10-30% pendiente	0.22	0.42	0.60
<b>Tierra agrícola</b>			
Plano 0-5% pendiente	0.30	0.50	0.60
Ondulado 5-10% pendiente	0.40	0.60	0.70
Montañoso 10-30% pendiente	0.52	0.72	0.82

Fuente. Schwab, Frevert, Erminster y Barnes 1996 modificada.

**TABLA 2.1.- Coeficientes de escurrimiento**

En caso de que el área de aporte se componga de áreas parciales con diferentes características, el coeficiente de escorrentía se determina mediante la ponderación de los coeficientes de estas áreas parciales.

Se recomienda efectuar al menos tres mediciones consecutivas y luego promediar siguiendo la metodología anteriormente descrita.

### **Intensidad de lluvia**

En muchos lugares no se dispone de datos pluviométricos exactos, y menos aún de datos sobre la intensidad de la precipitación. Además, frecuentemente existe una gran variación en los datos de precipitación e intensidad de las lluvias, lo cual dificulta la obtención de datos confiables, como por ejemplo, en áreas montañosas. A menudo sí es posible disponer de datos confiables de la precipitación mensual o anual que pueden ser utilizados como insumo para la determinación del volumen escurrido.

### **Superficie (A)**

La superficie de un área de aporte puede ser determinada mediante mapas topográficos (escala 1:5-000 o 1: 10-000) o, ya que frecuentemente se trata de áreas pequeñas (2 a 10 hectáreas) a través de mediciones con cinta métrica.

En muchos casos el agua de los atajados será utilizada tanto en la época de lluvias (para riego complementario) como en la época de estiaje. Esto significa que el atajado puede llenarse varias veces. En este caso, en los cálculos hay que aplicar un área de captación mayor al que se aplica cuando se almacena agua una sola vez. Este manejo, entre otras cosas, dependerá del patrón de lluvia y del requerimiento de agua y las habilidades de coleccionar agua.

## **2.5 EL USO DEL AGUA**

El agua almacenada en atajados frecuentemente es utilizada para fines múltiples. Los más importantes son riego, agua para los animales y uso doméstico, o una combinación de ellos. Además, en un número creciente de atajados se están criando peces; especialmente en los atajados que tienen una fuente de agua permanente.

### **2.5.1 Uso para riego**

Dependiendo de la zona, el régimen hidrológico y las necesidades de los cultivos y prioridades del productor, el agua de los atajados se puede utilizar para riego en la época de lluvias y/o en la época de estiaje. En la época de lluvias el riego se utiliza como complemento de las lluvias para asegurar la producción agrícola cuando no llueve. En este caso la superficie que se pueda regar con el agua almacenada en el atajado es mucho mayor dependiendo del régimen de las lluvias, la situación climatológica en general, el suelo, los cultivos y el manejo por el agricultor.

Cuando se utiliza el agua para riego en la época de estiaje, se trata de captar el mayor volumen posible al final de la época de lluvias para regar un "segundo" cultivo. Esta producción dependerá completamente del agua acumulada en el atajado. La superficie del área para regar fuera de la época de lluvias también depende de la situación climatológica, el suelo, los cultivos y más que todo el manejo del agua por el agricultor. Pero como valor referencial se puede partir de 5000 m<sup>3</sup> de agua para producir una hectárea de papa.

La pérdida del agua por la conducción depende del tipo de suelo en donde está excavado el canal y la longitud del mismo, siendo un dato difícil de predeterminedar sin hacer alguna medición en el terreno. En el caso de los atajados esta pérdida es reducida porque se trata de canales relativamente cortos, menos de 50 m y muchas veces no se toma en cuenta esta pérdida. La pérdida de agua por aplicación es significativa y está en función del tipo de riego.

### **2.5.2 Uso para animales**

El requerimiento del agua para animales varía mucho con el clima (temperatura y precipitación), tipo de comida (contenido de material seco) y el uso del animal (trabajo, leche, en descanso). En general los requerimientos se incrementan con temperaturas elevadas y baja humedad ambiental, El requerimiento también se incrementa cuando el contenido del agua en el forraje disminuye. Producción (leche, carne, huevos) y trabajo también incrementan los requerimientos del agua.

### **2.5.3 Uso doméstico**

El requerimiento del agua del atajado para uso doméstico depende mucho de la zona, del acceso al agua y del tipo de uso como la cocina, lavandería, higiene y otros.

## 2.6 PÉRDIDAS POR EL ALMACENAMIENTO DEL AGUA.

Inherente al almacenamiento y uso del agua del atajado existen pérdidas. Estas puede ser de dos tipos: pérdidas por evaporación y pérdidas por infiltraciones del agua en la base y los terraplenes del atajado.

- **Evaporación.**

Del latín evaporatio, la evaporación se define como la acción y efecto de evaporar o evaporarse. Este verbo, por su parte hace referencia a la transformación de un líquido en vapor.

Durante el proceso físico denominado evaporación, una sustancia líquida pasa lenta y gradualmente a un estado gaseoso, una vez que haya adquirido la energía necesaria para aumentar su superficie. Es importante no confundir este término con ebullición, ya que la evaporación no requiere de una temperatura en particular; más aún, cuanto mayor sea ésta, antes tendrá lugar.

Cabe mencionar que se trata de un fenómeno absolutamente necesario para el ciclo de la vida, dado que el agua en estado gaseoso se condensa y se convierte en nubes, las cuales recobran su forma líquida durante la lluvia, que mantiene fértiles nuestros suelos. Asimismo, este regreso del agua a la tierra puede darse a través de las nevadas, de rocío o de niebla.

Sobre la superficie de una sustancia líquida, a menos que haya alguna obstrucción, una porción de sus moléculas se encuentra en estado gaseoso; cuando ésta se equilibra se establece la presión de la fase gaseosa saturante, que no está directamente relacionada con el volumen, sino con la temperatura y el tipo de líquido. Si la cuantía de gas es menor a dicha presión, entonces tiene lugar la evaporación, ya que un porcentaje de las moléculas cambia de estado; por otro lado, si la presión es igual a la de la atmósfera se da la ebullición.

Cuando se inicia la evaporación, la cantidad de vapor sobre la superficie del agua va aumentando hasta que se iguale la presión de vapor del agua, a esa temperatura y a esa

presión atmosférica. Si por acción del viento, ascenso de la capa de vapor, etc., disminuye la concentración de vapor sobre la superficie del agua, entonces seguirá evaporándose más agua y así sucesivamente hasta secarse toda el agua.

Según lo anterior, los factores que tendremos en cuenta en la evaporación del agua, son:

**a) Radiación solar.**

Es el factor determinante de la evaporación ya que es la fuente de energía de dicho proceso.

**b) Temperatura del aire.**

El aumento de temperatura en el aire facilita la evaporación ya que: en primer lugar crea una convección térmica ascendente, que facilita la aireación de la superficie del líquido; y por otra parte la presión de vapor de saturación es más alta.

**c) Humedad atmosférica.**

Es un factor determinante en la evaporación ya que para ésta se produzca, es necesario que el aire próximo a la superficie de evaporación no esté saturado (situación que es facilitada con humedad atmosférica baja).

**d) El viento.**

Después de la radiación es el más importante, ya que renueva el aire próximo a la superficie de evaporación que está saturado. La combinación de humedad atmosférica baja y viento resulta ser la que produce mayor evaporación. El viento también produce un efecto secundario que es el enfriamiento de la superficie del líquido y la consiguiente disminución de la evaporación.

**e) Salinidad**

Disminuye la evaporación, fenómeno que sólo es apreciable en el mar.

Con estas nociones podemos saber comparativamente cuando se produce más evaporación.

- ✓ En las mismas condiciones ambientales, el agua dulce se evapora antes que el agua salada.
- ✓ El agua caliente se evapora antes que el agua fría o el hielo.

- ✓ Si hace viento que arrastre el aire con vapor de agua, “deja sitio” a más vapor de agua y por tanto hay más evaporación.
- ✓ En lugares con presión atmosférica más baja (montañas) se evapora el agua más rápidamente que cuando la presión atmosférica es más alta (nivel del mar), si existen las mismas condiciones de temperatura y renovación de aire.

#### a) Radiación Solar.

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarrojo y ultravioleta). La luz visible son las radiaciones comprendidas entre  $0,4 \mu\text{m}$  y  $0,7 \mu\text{m}$  pueden ser detectadas por el ojo humano. Existen radiaciones situadas en la parte infrarroja del espectro de la cual una parte es ultravioleta.

La radiación solar se mide normalmente con un instrumento denominado piranómetro.



**FIGURA 2.1.- Piranómetro.**

Un piranómetro (también llamado solarímetro y actinómetro) es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados. En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiaciones.

#### **Tipos de Radiaciones**

- Radiación directa: llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.
- Radiación Difusa: Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación se denomina difusa, va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.
- Radiación Reflejada: Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.
- Radiación global: Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones.

#### **b) Temperatura ambiente.**

Temperatura ambiente es la temperatura que se puede medir con un termómetro y que se toma del ambiente actual, por lo que, si se toma de varios puntos en un área a un mismo tiempo puede variar.

Esto es debido a que una temperatura tomada en un ambiente tan frío como lo es el Polo Norte, donde la temperatura sería bajo cero (si se mide en grados Fahrenheit o en Centígrados), no será igual a una tomada en un lugar tan cálido como un desierto donde la temperatura estaría muy por encima del cero.

El termómetro es un instrumento de medición de temperatura. Desde su invención ha evolucionado mucho, principalmente a partir del desarrollo de los termómetros electrónicos digitales.

Inicialmente se fabricaron aprovechando el fenómeno de la dilatación, por lo que se prefería el uso de materiales con elevado coeficiente de dilatación, de modo que, al aumentar la temperatura, su estiramiento era fácilmente visible. El metal base que se

utilizaba en este tipo de termómetros ha sido el mercurio, encerrado en un tubo de vidrio que incorporaba una escala graduada.



**FIGURA 2.2.- Termómetro de cristal.**

### **c) Humedad atmosférica.**

La humedad del aire se debe al vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera. El vapor procede de la evaporación de los mares y océanos, de los ríos, los lagos, las plantas y otros seres vivos. La cantidad de vapor de agua que puede absorber el aire depende de su temperatura. El aire caliente admite más vapor de agua que el aire frío. Una forma de medir la humedad atmosférica es mediante el higrómetro. El vapor de agua tiene una densidad menor que el aire, luego el aire húmedo (mezcla de aire y vapor) es menos denso que el aire seco. Además, las sustancias, al calentarse, dilatan, luego tienen menor densidad. El aire caliente que contiene vapor de agua se eleva en la atmósfera. La temperatura de la atmósfera disminuye una media de  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  cada 100 m. Al llegar a zonas más frías el vapor de agua se condensa y forma las nubes (de gotas de agua o cristales de hielo). Cuando estas gotas de agua o cristales de hielo pesan demasiado caen y originan las precipitaciones en forma de lluvia o nieve.

Un higrómetro o hidrógrafo es un instrumento que se utiliza para medir el grado de humedad del aire, u otro gas.

El higrómetro de absorción utiliza sustancias químicas higroscópicas, las cuales absorben y exhalan la humedad, según las circunstancias que los rodean.

El higrómetro eléctrico está formado por dos electrodos arrollados en espiral entre los cuales se halla un tejido impregnado de cloruro de litio acuoso. Si se aplica a estos electrodos una tensión alterna, el tejido se calienta y se evapora una parte del contenido de agua. A una temperatura definida, se establece un equilibrio entre la evaporación por

calentamiento del tejido y la absorción de agua de la humedad ambiente por el cloruro



de litio, que es un material muy higroscópico. A partir de estos datos se establece con precisión el grado de humedad.

**FIGURA 2.3.- Medidor digital de humedad atmosférica.**

#### **d) Velocidad del viento.**

El viento produce energía porque está siempre en movimiento. Se estima que la energía contenida en los vientos es aproximadamente el 2% del total de la energía solar que alcanza la tierra. El contenido energético del viento depende de su velocidad.

Cerca del suelo, la velocidad es baja, aumentando rápidamente con la altura. Cuanto más accidentada sea la superficie del terreno, más frenará ésta al viento. Es por ello que sopla con menos velocidad en las depresiones terrestres y más sobre las colinas. No obstante, el viento sopla con más fuerza sobre el mar que en la tierra.

El instrumento que mide la velocidad del viento, es el anemómetro, que generalmente está formado por un molinete de tres brazos, separado por ángulos de 120° que se mueve alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y accionan un contador que indica en base al número de revoluciones, la velocidad del viento incidente.

La velocidad del viento se mide preferentemente en náutica en nudos y mediante la escala Beaufort: Esta es una escala numérica utilizada en meteorología que describe la

velocidad del viento, asignándole números que van del 0 (calma) al 12 (huracán). Fue ideada por el Almirante Beaufort en el siglo XIX.

Escala de Beaufort	Denominación	Efectos observados	Nudos	Km/hora
0	Calma	El humo se eleva en vertical.	menos de 1	0 a 1,9
1	Ventolina ó brisa muy ligera	El viento inclina el humo, no mueve banderas.	1 a 3	1,9 a 7,3
2	Flojito ó brisa ligera	Se nota el viento en la cara.	4 a 6	7,4 a 12
3	Flojo ó pequeña brisa	El viento agita las hojas y extiende las banderas.	7 a 10	13 a 19
4	Bonancible ó brisa moderada	El viento levanta polvo y papeles.	11 a 16	20 a 30
5	Fresquito ó buena brisa	El viento forma olas en los lagos.	17 a 21	31 a 40
6	Fresco	El viento agita las ramas de los árboles, silban los cables, brama el viento.	22 a 27	41 a 51
7	Frescachón	El viento estorba la marcha de un peatón.	28 a 33	52 a 62
8	Duro	El viento arranca ramas pequeñas.	34 a 40	63 a 75
9	Muy duro	El viento arranca chimeneas y tejas.	41 a 47	76 a 88
10	Temporal ó tempestad	Grandes estragos.	48 a 55	89 a 103
11	Tempestad violenta	Devastaciones extensas.	56 a 63	104 a 118
12	Huracán	Huracán catastrófico.	64 y más	119 y más

**Tabla 2.2.- Medición de la fuerza del viento según la escala Beaufort**

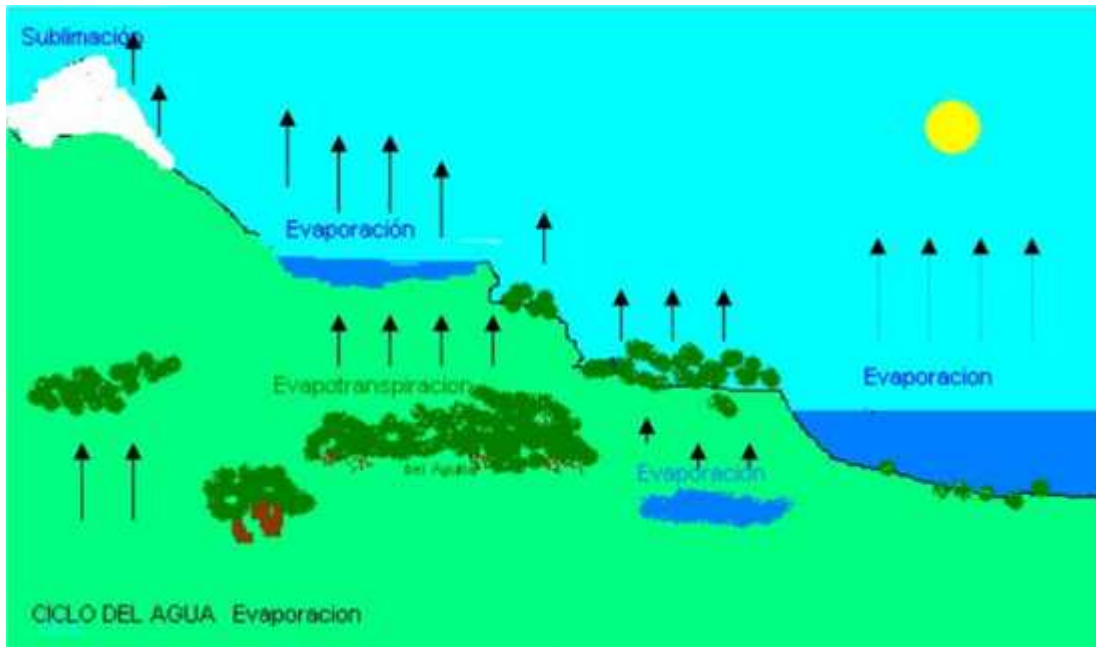
El anemómetro es un aparato meteorológico que se usa para la predicción del clima y, específicamente, para medir la velocidad del viento. Asimismo es uno de los instrumentos de vuelo básico en el vuelo de aeronaves más pesadas que el aire.

En meteorología, se usan principalmente los anemómetros de cazoletas o de molinete, especie de diminuto molino de tres aspas con cazoletas sobre las cuales actúa la fuerza del viento; el número de vueltas puede ser leído directamente en un contador o registrado sobre una banda de papel (anemograma), en cuyo caso el aparato se denomina anemógrafo. Aunque también los hay de tipo electrónicos.

Para medir los cambios repentinos de la velocidad del viento, especialmente en las turbulencias, se recurre al anemómetro de filamento caliente, que consiste en un hilo de platino o níquel calentado eléctricamente: la acción del viento tiene por efecto enfriarlo y hace variar así su resistencia; por consiguiente, la corriente que atraviesa el hilo es proporcional a la velocidad del viento.



**FIGURA 2.4.- Anemómetro de molinete.**



**FIGURA 2.5.- Ciclo del agua. EVAPORACIÓN**

Como vemos, allí donde hay agua se produce evaporación en mayor o menor medida y rapidez. Así, comentando el gráfico anterior de evaporación del agua a la atmósfera de forma natural y habitual, podemos distinguir cinco fuentes principales de evaporación:

**1) Evaporación en océanos y mares.**

Además de la evaporación del agua en la superficie marina se forma aerosoles que pasan a la atmósfera que pueden contener además de sales, sustancias orgánicas, algas, bacterias y en general pequeñas partículas que quedan retenidas en las nieblas.

**2) Evaporación superficial terrestre.**

El agua que hay en la superficie terrestre como ríos, lagos, charcas, agua de lluvia (sobre superficies, vegetación, etc.), etc. es evaporada y puede contener también sustancias volátiles de origen orgánico, partículas del aire, etc.

**3) Evaporación de la humedad de la tierra.**

La humedad que posee la tierra bien por origen de la lluvia, afloramiento de acuíferos, condensación sobre la tierra, etc. también se evapora cuando ocurren las condiciones adecuadas. Cuando se evapora el agua de la capa superficial de tierra puede ascender más agua a la superficie por capilaridad y también se evapora. Dependiendo de la porosidad del terreno, puede evaporarse el agua de hasta 1 m por debajo de la superficie.

#### **4) Transpiración.**

Este fenómeno consiste en la evaporación del agua que transpiran los seres vivos (principalmente las plantas). La cantidad de agua que transpiran las plantas es muy importante y suponen la evaporación de agua que hay en el suelo que al ser absorbida por las plantas pasa después a la atmósfera. La profundidad del agua extraída y evapotranspirada por la planta depende de la profundidad de las raíces.

#### **5) Sublimación.**

Es la generación de vapor de agua a partir del hielo y la nieve. Evidentemente se genera menos cantidad de vapor porque la presión de vapor del hielo es baja y contribuye poco a la evaporación total del ciclo del agua.

### ○ **INFILTRACIÓN**

El agua precipitada sobre la superficie de la Tierra, queda detenida, escurre por ella, o bien penetra hacia el interior. De esta última fracción se dice que se ha filtrado. El interés económico del fenómeno, es evidente si se considera que la mayor parte de los vegetales utilizan para su desarrollo agua infiltrada y que el agua subterránea de una región tiene como presupuesto previo para su existencia, que se haya producido infiltración.

Infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente. Superada por la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad. Esta parte del proceso recibe distintas denominaciones: percolación, infiltración eficaz, infiltración profunda, etc.

#### **Factores que afectan la infiltración.**

El agua, para infiltrarse, debe penetrar a través de la superficie del terreno y circular a través de éste. Hay dos grupos de factores que influyen en el proceso:

- Factores que definen las características del terreno o medio permeable.
- Factores que definen las características del fluido (agua) que se infiltra.

Algunos de estos factores influyen más en la intensidad de la infiltración, al retardar la entrada del agua, que en el total de volumen infiltrado, pero tal consideración se desprende, intuitivamente, de la descripción que a continuación se hace de ellos:

### **Características del terreno o medio permeable.**

- Condiciones de superficie. La compactación natural, o debida al tránsito, dificulta la penetración del agua y por tanto, reduce la capacidad de infiltración. Una superficie desnuda está expuesta al choque directo de las gotas de lluvia, que también da lugar a la compactación, lo que también disminuye la infiltración.

Cuando un suelo está cubierto de vegetación, las plantas protegen de la compactación por impacto de lluvia, se frena el recorrido superficial del agua que está, así, más tiempo expuesta a su posible infiltración, y las raíces de las plantas abren grietas en el suelo que facilitan la penetración del agua.

La pendiente del terreno influye en el sentido de mantener más o menos tiempo una lámina de agua de cierto espesor sobre él. La especie cultivada, en cuanto define mayor o menor densidad de cobertura vegetal, y sobre todo, el tratamiento agrícola aplicado, influirán en la infiltración. En las áreas urbanizadas se reduce considerablemente la posibilidad de infiltración.

- Características del terreno. La textura del terreno influye por sí y por la influencia en la estabilidad de la estructura, tanto menor cuanto mayor sea la proporción de materiales finos que contenga. Un suelo con gran cantidad de limos y arcillas está expuesto a la disgregación y arrastre de estos materiales por el agua, con el consiguiente llenado de poros más profundos.

La estructura define el tamaño de los poros. La existencia de poros grandes reduce la tensión capilar, pero favorece directamente la entrada de agua.

El calor específico del terreno influirá en su posibilidad de almacenamiento de calor que, afecta a la temperatura del fluido que se infiltra, y por tanto a su viscosidad.

El aire que llena los poros libres del suelo, tiene que ser desalojado por el agua para ocupar su lugar y esto suaviza la intensidad de la infiltración, hasta que es desalojado totalmente.

- Condiciones ambientales. La humedad inicial del suelo juega un importante papel. Cuando el suelo está seco al comienzo de la lluvia, se crea una fuerte capilaridad al humedecerse las capas superiores y este efecto, se suma al de gravedad incrementando la intensidad de infiltración. A medida que se humedece, se hinchan por hidratación, las arcillas y coloides y cierran las fracturas y grietas disminuyendo la capacidad de infiltración.

Por otra parte, el agua que alcanza el nivel acuífero es el total de la infiltrada menos la retenida por el suelo.

- Características del fluido que se infiltra

La turbidez del agua afecta la intensidad de la infiltración, especialmente por los materiales finos en suspensión que contiene, que penetran en el suelo y reducen por colmatación la permeabilidad.

El contenido en sales, a veces, favorece la formación de flóculos con los coloides del suelo y reduce por el mismo motivo, la intensidad de infiltración. En otras ocasiones, puede ocurrir lo contrario, al producirse defloculación.

La temperatura del agua afecta a su viscosidad y en consecuencia, a la facilidad con que discurrirá por el suelo. Debido a ello se han obtenido para el mismo terreno, intensidades de infiltraciones menores en invierno que en verano.

### **Aparatos para medir la infiltración.**

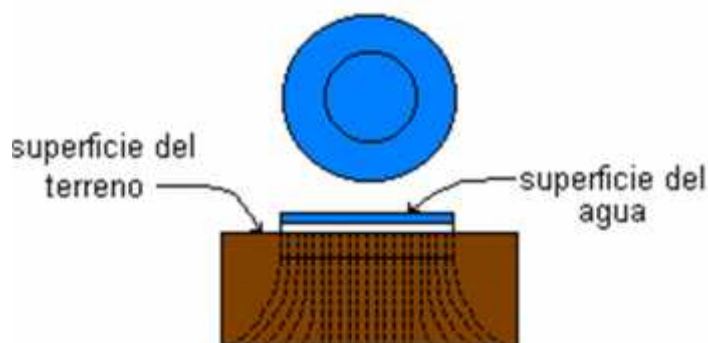
Para medir la infiltración de un suelo se usan los infiltrómetros, que sirven para determinar la capacidad de infiltración en pequeñas áreas cerradas, aplicando artificialmente agua al suelo.

Los infiltrómetros se usan con frecuencia en pequeñas cuencas o en áreas pequeñas o experimentales dentro de cuencas grandes. Cuando en el área se presenta gran variación en el suelo y vegetación, ésta se subdivide en sub-áreas relativamente uniformes, de las cuales haciendo una serie de pruebas se puede obtener información aceptable.

Siendo la infiltración un proceso complejo, es posible inferir con los infiltrómetros la capacidad de infiltración de cualquier cuenca en forma cualitativa, pero no cuantitativa. La aplicación más favorable de este equipo se obtiene en zonas experimentales, donde se puede evaluar la infiltración para diferentes tipos de suelo y contenido de humedad.

Los infiltrómetros se pueden dividir en dos grupos: de carga constante y simuladores de lluvia.

- Infiltrómetros de carga constante. Permiten conocer la cantidad de agua que penetra en el suelo en un área cerrada a partir del agua que debe agregarse a dicha área para mantener un tirante constante, que generalmente es de medio centímetro.



**FIGURA 2.6.- Infiltrómetro de carga constante**

Los infiltrómetros de carga constante (Figura 2.6) más comunes consisten en dos aros concéntricos, o bien en un solo tubo; en el primer tipo, se usan dos aros concéntricos de 23 y 92 cm de diámetro respectivamente, los cuales se hincan en el suelo varios centímetros.

El agua se introduce en ambos compartimentos, los cuales deben conservar el mismo tirante. El objeto del aro exterior es evitar que el agua dentro del aro interior se expanda en una zona de penetración mayor que el área correspondiente; la

capacidad de infiltración del suelo se determina a partir de la cantidad de agua que hay que agregar al aro interior para mantener su tirante constante.

El segundo tipo consiste en un tubo que se introduce en el suelo hasta una profundidad igual a la que penetra el agua durante la medición lo que evita que el agua se expanda, en este caso se mide el agua que se le agrega para mantener el nivel constante.

Aunque estos aparatos proporcionan un método simple y directo para determinar la cantidad de agua que absorbe el suelo con estas condiciones, sólo se considera la influencia del uso del suelo, vegetación y algunas variables físicas. Esta forma de medir la infiltración puede cambiar con respecto a la real porque no toma en cuenta el efecto que producen las gotas de lluvia sobre el suelo, como son la compactación y el lavado de finos. Por otra parte, tampoco considera el efecto del aire atrapado, el cual se escapa lateralmente; además, es imposible hincar los aros o el tubo sin alterar las condiciones del suelo cerca de su frontera, pudiendo ser afectado un porcentaje apreciable del área de prueba ya que ésta es muy pequeña.

- Simuladores de lluvia. Con el objeto de evitar en lo posible las fallas de los infiltrómetros de carga constante, se usan los infiltrómetros que simulan la lluvia, aplicando el agua en forma constante al suelo mediante regaderas.

El área que estos simuladores cubre varía generalmente entre 0.1 y 40 m<sup>2</sup>. En estos aparatos la capacidad de infiltración se deduce midiendo el escurrimiento superficial resultante de una lluvia uniforme. Existen diversos tipos de infiltrómetros de esta clase, dependiendo del sistema generador de lluvia y la forma de recoger el escurrimiento superficial del área en estudio.

La capacidad de infiltración media en la cuenca  $\mathcal{A}$ , se puede obtener con las mediciones de infiltrómetros en puntos representativos de las diferentes características del suelo de la cuenca.

### **Métodos para calcular la infiltración.**

Todos los métodos disponibles para determinar la capacidad de infiltración en una cuenca están basados en el criterio expuesto cuando se analizó el infiltrómetro simulador de lluvia, o sea en la relación entre lo que llueve y lo que escurre. En la práctica resulta complicado analizar detalladamente el fenómeno y sólo es posible

hacerlo, con ciertas limitaciones, para cuencas pequeñas donde ocurren tormentas sucesivas.

Los métodos que permiten calcular la infiltración en una cuenca para una cierta tormenta, requieren del hietograma de la precipitación media y de su correspondiente hidrograma. Esto implica que en la cuenca donde se requiere evaluar la infiltración se necesita, por lo menos un pluviógrafo y una estación de aforo en su salida. En caso de contar únicamente con estaciones pluviométricas sólo se podrán hacer análisis diarios.

Se considera que:

$$P = Q + F$$

Donde:

P = Volumen de precipitación (m<sup>3</sup>)

Q = Volumen de escurrimiento directo (m<sup>3</sup>)

F = Volumen de infiltración (m<sup>3</sup>)

En esta ecuación se considera que F involucra las llamadas pérdidas que incluyen la intercepción de agua por plantas y el almacenamiento en depresiones (techos de edificios, casas, embalses) ya que no es factible medirlos; además, en esta forma se evalúa todo el escurrimiento directo, que es de interés fundamental ya que permite determinar la cantidad de agua que escurre con respecto a la que llueve.

## **2.7 IMPERMEABILIZACIÓN DE LOS RESERVORIOS**

### **2.7.1 Con arcilla compactada**

Es un método económico para lograr impermeabilizar los reservorios de agua, pero con este no se garantiza impermeabilizarlos completamente, esto debido a que depende del control que se realizó a la hora de la construcción, puesto que esta debe tener un grado de compactación óptimo para lograr que las pérdidas en el reservorio solo sean por evaporación y en un grado mucho menor por infiltración.

### **2.7.2 Con hormigón ciclópeo**

El reservorio revestido de hormigón ciclópeo (piedra bolón, arena y cemento) tiene un mayor costo, sin embargo su eficiencia es alta ya que se logra reducir la pérdida de agua por infiltración, solamente tiene pérdidas por evaporación.

### **2.7.3 Con geo-membrana.**

Los tratamientos de impermeabilización son algunas de las cuestiones a las que más atención se debe brindar en una construcción, especialmente cuando se trata de presas, tanques de almacenamiento, canales o todo tipo de reservorio de agua de gran envergadura. Una de las soluciones vigentes más efectivas y convenientes consiste en el uso de geo-membranas para la impermeabilización de reservorios de agua.

El tratamiento consiste en la aplicación de una membrana que funciona como barrera, que se encuentra compuesta por varias capas de polímeros. Esto le otorga una gran resistencia, por lo que sus aplicaciones se extienden a todo tipo de reservorios de materiales líquidos de muy distintas naturalezas químicas.

Optar por el uso de geo-membranas para la impermeabilización de superficies que funcionarán como reservorios de agua tiene una serie de beneficios. En primer lugar, por la gran resistencia de los materiales que las componen son muy duraderas, y tienen una gran tolerancia química, es decir, resisten a la acción de líquidos peligrosos. A la vez, resisten perfectamente a la radiación ultravioleta.

La impermeabilización con geo-membranas es uno de las más grandes opciones que existen para crear barreras aislantes entre un material determinado y el contacto directo con el suelo, siendo los geo sintéticos más utilizados en el campo de la construcción, siendo muy empleados en el desarrollo de rellenos sanitarios, piscinas y otros elementos que requieren no sólo el aislamiento del suelo frente a los líquidos que se pueden filtrar en el mismo, sino para evitar que líquidos desde el suelo emerjan y debiliten la estructura construida.



**FIGURA 2.7.- Rollos de geo-membrana.**

**Qué son y cómo funcionan las geo-membranas.**

Este tipo de geo sintéticos son delgadas hojas de materiales poliméricos que se utilizan como impermeabilizantes y aislantes, permitiendo generar recubrimientos que dependiendo del tipo de material a aislar y a la construcción que se realice puede utilizarse geo-membrana de alta o de baja densidad, y su diferencia radica en la cantidad de polímeros aglomerados por cada centímetro cuadrado de material.

Cada vez que se instalan las geo-membranas se está ayudando al sostenimiento ambiental, evitando que materiales líquidos y residuos tóxicos ingresen y erosionen el suelo, así como se garantiza con el uso de estos materiales la durabilidad y estabilidad de cualquier construcción que requiera aislamiento impermeable.

Son materiales que ofrecen alta durabilidad, son resistentes a casi cualquier líquido por tóxico que éste sea, presenta una alta resistencia al vertimiento de químicos peligrosos y son resistentes a la radiación ultravioleta resistiendo la exposición al sol por algún tiempo sin debilitar sus tejidos y sin que su calidad disminuya.

Las membranas de polietileno o geo-membranas, son elementos que se utilizan en el desarrollo de proyectos de impacto ambiental alto, para proteger el suelo del contacto y la filtración de líquidos o sustancias potencialmente tóxicas, que pueden llegar a destruir, erosionar y generar un daño ambiental grande en la superficie, si no son tratadas correctamente, siendo estas una solución fácil y segura para asegurar que cualquier desarrollo constructivo como relleno sanitario o una nueva vía no generarán problemas en el suelo por sustancias como lixiviados o asfalto que si llegasen a filtrarse en el suelo podrían ser fatales para el desarrollo ambiental del entorno y perjudicarían a los habitantes de la zona de influencia.

### **Clases de membranas de polietileno**

Las membranas de polietileno, son generalmente clasificadas en dos grandes grupos, que por su construcción y su finalidad se pueden diferenciar. Estas dos grandes categorías o clases son:

- De alta densidad o HDPE: Son membranas muy resistentes a los ataques químicos que las sustancias propias de los lugares donde son instaladas pueden ofrecer, siendo perfectas para aislar el suelo en rellenos sanitarios o lagunas de oxidación. Son materiales altamente flexibles y con una tracción excelente, además de ser muy resistentes a los rayos ultravioletas y poco permeables.

- Las de polietileno ultra flexible o LLDPE, tienen características similares a las anteriores, pero con mucha más flexibilidad para su adaptación a cualquier tipo de terreno, sin importar que tenga depresiones o colinas pronunciadas, y se utiliza para sellar vertederos o para instalar en suelos que tienen alta probabilidad de movimiento, para lo que es muy útil tener membranas flexibles que se ajusten perfectamente a cualquier terreno.

## **2.8 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS**

El precio unitario puede definirse como el importe de la remuneración o pago total, que debe cubrirse al contratista por unidad de obra de cada uno de los conceptos de trabajo que realice. Así mismo, unidad de obra puede definirse como la unidad de medición que se señala en las especificaciones técnicas, como base para cuantificar cada concepto de trabajo para fines de medición y pago. El concepto de trabajo o concepto de obra, podrá quedar definido como el conjunto de operaciones y materiales que, de acuerdo con las especificaciones respectivas, integran cada una de las partes de una obra en que esta se divide convencionalmente para fines de medición y pago.

Resumiendo en un sola expresión los conceptos tratados anteriormente, se puede establecer en una forma más amplia que el precio unitario es la remuneración que recibe el contratista por las operaciones que realiza y los materiales que emplea en la ejecución de las distintas partes de una obra, considerando la unidad que de acuerdo con las especificaciones respectivas, se fija para efectos de medición de la ejecución.

Lo anterior, lógicamente, coincide con lo que tradicionalmente se ha considerado como precio unitario y además, cabe hacer notar que se ha establecido una liga íntima entre el precio unitario y la especificación, pues esta última es preponderante en él, aun cuando no sea lo único que lo determina.

Generalmente, cuando se realiza un presupuesto, se tiene un tiempo definido para realizarlo y desde el punto de vista de una empresa constructora, se tiene que cumplir con una serie de aspectos técnicos para la presentación de la propuesta, por lo tanto se deben tomar los siguientes aspectos:

Se debe analizar el calendario para la presentación de la propuesta, es decir tomar en cuenta cuando se terminará el análisis de los precios de los materiales, el tiempo en que se terminará de elaborar los aspectos técnicos de la propuesta, tiempo que se requerirá la compaginación de la propuesta, etc.

Posteriormente se debe realizar un exhaustivo análisis de las bases de la licitación plasmado en el pliego de condiciones otorgado por la empresa contratante.

Se debe preparar un listado de cotizaciones de los materiales a utilizar en la obra, para esto se debe tener claramente identificadas las exigencias y especificaciones técnicas que pide la entidad contratante. En el caso de cotizaciones de subcontratos se debe procurar entregar el máximo de información disponible al cotizador.

Una vez tomado un conocimiento cabal del trabajo a ejecutar y las condiciones impuestas por la entidad contratante es siempre recomendable una visita al lugar, que generalmente es exigida por la entidad contratante en el pliego de condiciones. En esta visita al lugar se debe detectar las condiciones en que se deberá efectuar la obra, los accesos, sitios de instalación de faenas, restricciones de paso en puentes y caminos, calidad del terreno, disponibilidad de materiales, maderas, combustible, agua potable, medios de transporte del personal, verificar el mercado de los materiales a utilizar, climatología, etc.

Otro paso importante en el estudio del presupuesto es el de proveerse de un listado de precios actualizado de mano de obra y maquinarias. En el caso de las maquinarias se debe tomar en cuenta el costo del combustible o la fluctuación que tendrá este durante el transcurso de la realización de la obra, mantenimiento, desgaste de neumáticos, etc.

### **Factores del precio unitario.**

El precio unitario está conformado por una serie de factores, los mismos que se han clasificado en dos grupos, el correspondiente a los llamados de dependencia y los de consistencia.

#### **2.8.1 Factores de dependencia.**

Son aquellos que por sus características y la relación que guardan con la ejecución del concepto de obra influyen en forma directa e indirecta en la magnitud del precio unitario. Estos factores se han dividido a su vez en controlables e incontrolables, división que se ha establecido tomando en cuenta, para los controlables que estos son factores cuyo conocimiento, en la mayor parte de los casos, es previo a la determinación del precio unitario, consecuentemente se puede ejercer un control sobre ellos para modificar en más o menos, algunos de los costos que integran al precio unitario. Para los incontrolables, son factores cuya posible variación durante la ejecución de la obra hace que su influencia sobre la magnitud del precio unitario no pueda controlarse con anticipación, a menos que se haga una inversión fuerte en los estudios.

Como factores controlables tenemos: el proyecto, las especificaciones y los programas. El proyecto puede modificarse a voluntad dentro de ciertos límites, para cambiar las condiciones de ejecución de la obra, principalmente en cuanto a dimensiones y distribución de los distintos elementos estructurales y proporcionar así diferentes alternativas para los conceptos de trabajo, logrando de esta manera modificaciones en los precios unitarios de los mismos, ejemplos: excavaciones en menor o mayor profundidad, elementos estructurales más o menos resistentes o más o menos complicados para su ejecución, las especificaciones podrán hacerse más o menos rígidas en cuanto a calidad y tolerancias en las dimensiones y en los acabados, finalmente el programa de ejecución podrá ampliarse o acortarse, estableciendo así una mayor o menor rapidez de ejecución, con una variación en la magnitud de los precios unitarios.

Como factores incontrolables, se tiene; la topografía, la geología, las condiciones legales y laborables, el clima, la ley de la oferta y demanda, etc. Aun cuando, tanto la topografía como la geología y las condiciones legales y laborales priman en la zona donde se va ejecutar la obra, pueden ser materia de estudio y análisis para determinar su influencia, el conocimiento de estos factores nunca será lo suficientemente amplio para poder determinar con precisión la influencia que tendrán en la magnitud de los precios unitarios y, por lo tanto, siempre habrá un cierto factor de incertidumbre que debe considerarse en alguno de los elementos que integran el mismo. Por lo que

corresponde al clima, es obvio que la predicción del mismo es aleatoria y en consecuencia incierta, motivo por el cual la influencia que tenga en los precios unitarios es incierta, con relación a la ley de la oferta y demanda puede influir en cierto forma en los costos de los materiales secundarios o de poco consumo, toda vez que los materiales primarios están sujetos a contratos que fijan los precios. En los salarios del personal no especializado ante la escasez de obreros en un momento dado, puede dar lugar a una elevación de salarios, de obra a obra o de contratista a contratista en el monto de la utilidad, pues tanto la magnitud de la obra como la política empresarial son determinantes para fijarlos, asimismo y de acuerdo a las políticas de la empresa, otros costos que integran el precio unitario, tales como los costos de las horas máquina y los costos indirectos pueden verse influenciados.

### **2.8.2 Factores de consistencia.**

Los factores de consistencia, cuya función principal es la de integrar el precio unitario de acuerdo con un ordenamiento y clasificación de los diferentes cargos que, aun cuando pueden presentar pequeñas variantes, puede considerarse como de aceptación general.

Al respecto y como primera división de estos factores, se tienen los correspondientes a los directos, indirectos, utilidad e imprevistos.

El factor de consistencia DIRECTOS, está integrado por una serie de costos como son los correspondientes a la mano de obra, materiales, maquinaria, herramientas e instalaciones. El factor de consistencia de los INDIRECTOS está formado por los de la administración central y los de la obra, agregándose los factores de imprevistos e utilidades.

La integración señalada anteriormente está de acuerdo con lo que al respecto tratan la mayor parte de los autores que han aportado a las técnicas de integración o análisis de precios unitarios, así como las bases y normas que se han establecido en el País.



### 3.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo en la ciudad de Tarija-Bolivia más propiamente en la comunidad de San Agustín Norte de la provincia Cercado, perteneciente a la Alta Cuenca del Río Santa Ana, se encuentra ubicado a  $21^{\circ}30'29,20''$  latitud Sur y  $64^{\circ}31'23,36''$  longitud Oeste y a una altitud aproximada de 2182 m.s.n.m., la Figura 3.1 muestra la ubicación del tramo en estudio con referencia a la ciudad de Tarija.



**FIGURA 3.1.- Ubicación del tramo en la ciudad de Tarija.**

El estudio se realizó en esta zona debido a que en la misma se lograron localizar reservorios ya construidos y además recubiertos con distintos materiales, lo cual es necesario para que ciertas variables hidrológicas y meteorológicas puedan ser consideradas como constantes (radiación solar, velocidad del viento, etc.). También se pudo observar que algunos de estos reservorios no se encuentran en funcionamiento, como es el caso del reservorio sin impermeabilización.

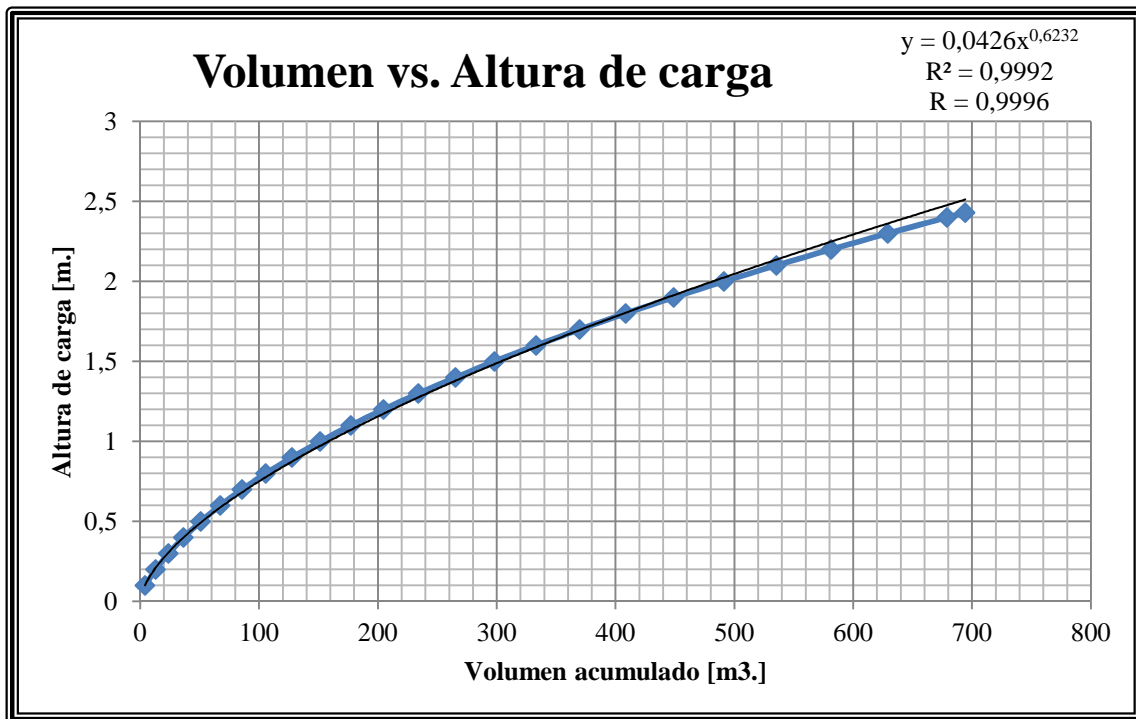
### 3.2 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LOS RESERVORIOS.

Para el desarrollo del presente trabajo se requiere determinar de cada reservorio que será objeto de estudio su volumen de almacenamiento, para lo cual se realizó un levantamiento topográfico con una estación total marca Leica, el mismo que se muestra en el [Anexo I](#); posteriormente con los datos obtenidos en campo, se procedió al trabajo de gabinete, en donde, con ayuda del paquete computacional AUTOCAD CIVIL 3D se logró calcular los volúmenes respectivos de cada reservorio, los cuales se muestran en la Tabla 3.1.

Adicionalmente al cálculo de volúmenes, el paquete computacional también nos permite el realizar el cálculo de áreas en los reservorios, esto con el fin de poder graficar las curvas volumen vs. Altura de carga, las cuales nos permitirán conocer el volumen de agua que no es aprovechada debido a las pérdidas por infiltración y evaporación.



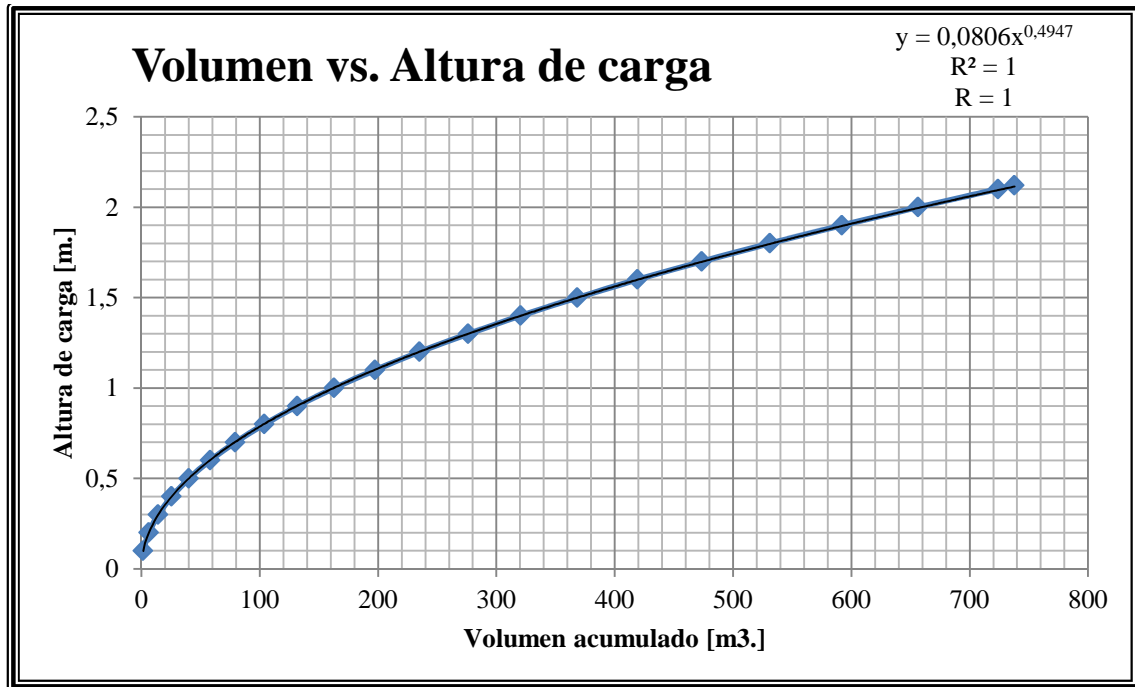
**FIGURA 3.2.- Fotografía del reservorio sin impermeabilización.**



**GRÁFICA 3.1.-** Curva de comportamiento “Volumen de almacenamiento vs. Altura de carga” del reservorio sin impermeabilización.



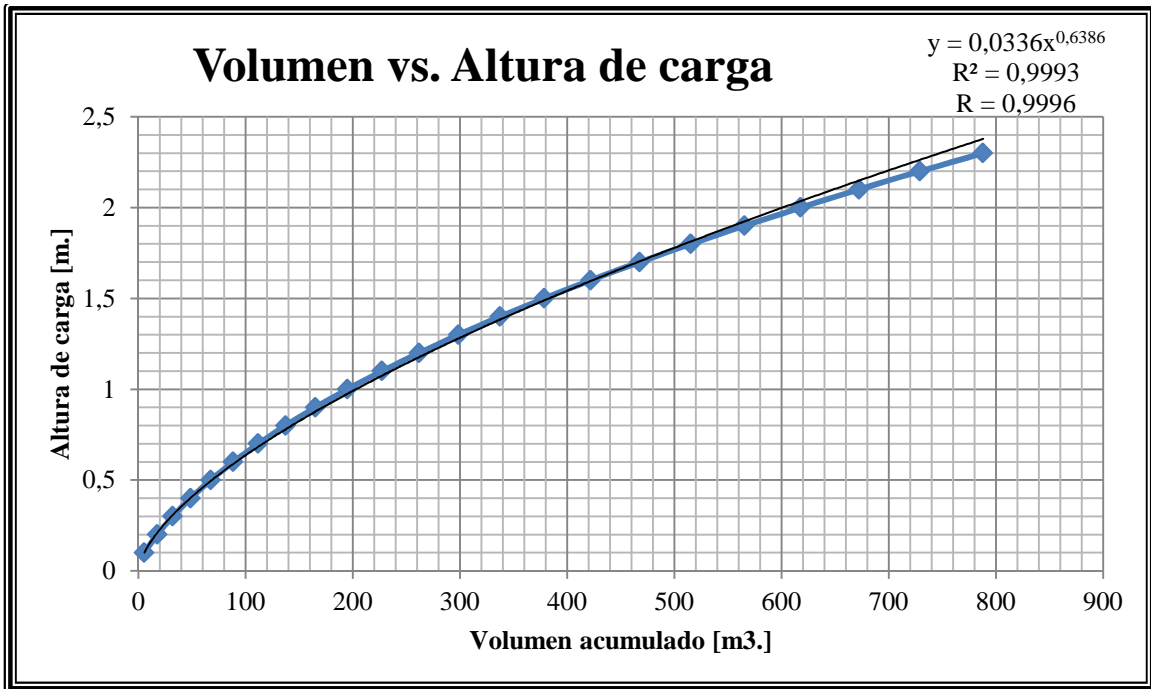
**FIGURA 3.3.-** Fotografía del reservorio impermeabilizado con arcilla compactada.



**GRÁFICA 3.2.-** Curva de comportamiento “Volumen de almacenamiento vs. Altura de carga” del reservorio impermeabilizado con arcilla compactada.



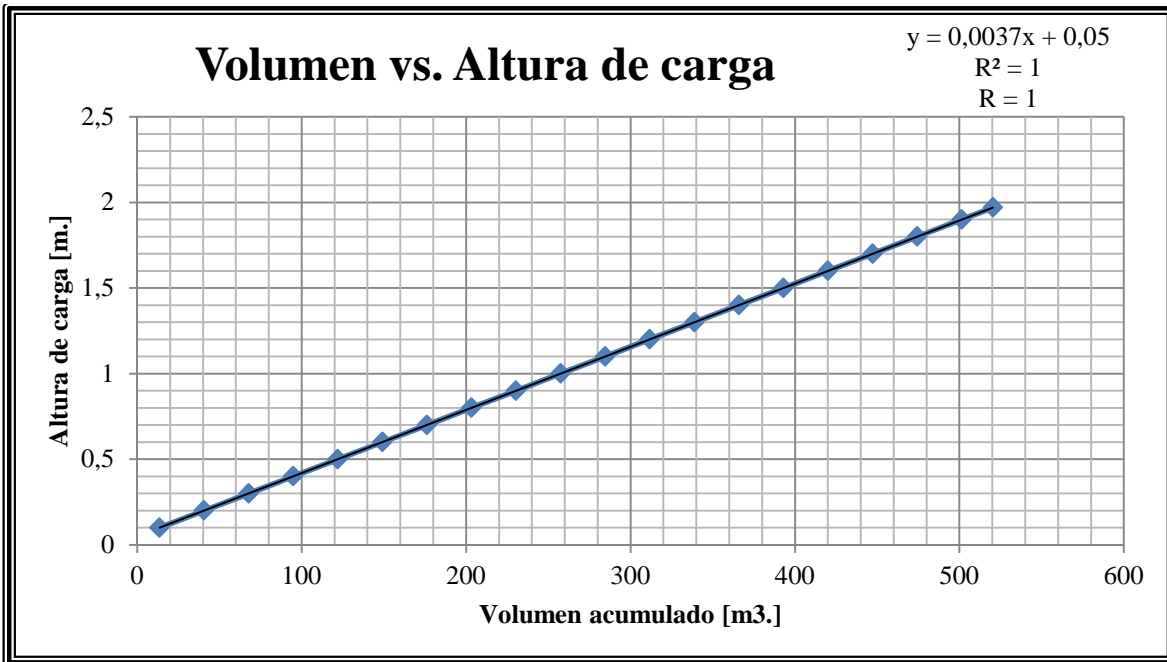
**FIGURA 3.4.-** Reservorio impermeabilizado con geo-membrana.



**GRÁFICA 3.3.-** Curva de comportamiento “Volumen de almacenamiento vs. Altura de carga” del reservorio impermeabilizado con geo-membrana.



**FIGURA 3.5.-** Reservorio impermeabilizado con hormigón ciclópeo.



**GRÁFICA 3.4.-** Curva de comportamiento “Volumen de almacenamiento vs. Altura de carga” del reservorio impermeabilizado con hormigón ciclópeo.

Reservorio	Volumen [m3]	Área espejo de agua [m2]	Área base [m2]	Altura de carga [m]
Sin impermeabilización	694,29	501,75	135,99	2,43
Impermeabilizado con Arcilla Compactada	737,85	721,75	102,08	2,12
Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo	520,38	271,03	271,03	1,97
Impermeabilizado con Geo-membrana	788,08	620,13	105,86	2,30

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 3.1.-** Volúmenes de almacenamiento, áreas de espejo de agua, de base y altura de carga de cada reservorio que fue objeto de estudio.



**FIGURA 3.6.- Levantamiento topográfico del reservorio sin impermeabilización realizado con una estación total Leica.**

### **3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS.**

Adicionalmente para el presente trabajo, también es necesario determinar las propiedades mecánicas de los suelos que recubren dos de los reservorios que son objeto de estudio, esto es necesario para poder clasificar el suelo y determinar su relación con las pérdidas por infiltración que sufren los reservorios, los mismos que se encuentran en el [Anexo II](#).

Para esto, se procedió a recolectar una muestra de suelo de cada reservorio, para llevarla a laboratorio y poder realizar los distintos ensayos que son necesarios, como: granulometría, límites de Atterberg, próctor T-99 y densidad In Situ; los cuales se describen a continuación:

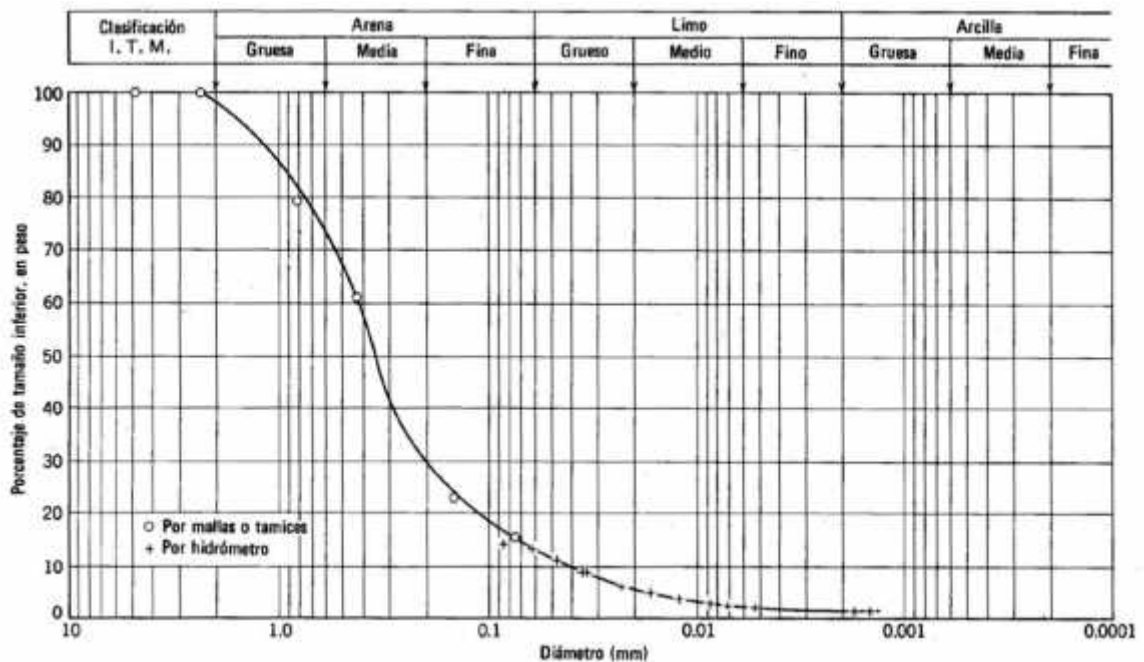
#### **3.3.1 Granulometría**

En cualquier masa de suelo, los tamaños de las partículas varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica, es decir, la distribución, en porcentaje, de los distintos tamaños dentro del suelo.

La distribución granulométrica de partículas de tamaño superior a 0,08 mm. se determina generalmente mediante un análisis granulométrico por tamizado. Para partículas de tamaño inferior al mencionado (0,08 mm.) se emplea la granulometría por sedimentación.

El análisis granulométrico por tamizado se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de tamices (cuyo tamaño de malla suele ir disminuyendo en progresión geométrica de razón 2), agitando el conjunto. La cantidad de suelo retenido en cada tamiz se pesa y se determina el porcentaje acumulado de material que pasa por cada tamiz.

El porcentaje de material que pasa por cada tamiz, determinado de la forma anterior, se representa en un gráfico semilogarítmico. El diámetro de la partícula se representa en una escala logarítmica (abscisas), y el porcentaje de material que pasa se representa en escala aritmética (ordenadas). En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de esta curva.



**FIGURA 3.7.- Curva granulométrica de un suelo.**

Una vez determinada dicha curva granulométrica, existen dos coeficientes que se utilizan para una mejor descripción de la granulometría de un suelo.

El coeficiente de uniformidad representa la relación entre el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 60% de material y el diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 10%. Si  $C_U$  es menor que 5, el suelo tiene una granulometría uniforme. Si  $5 < C_U < 20$ , el suelo es poco uniforme; y si  $C_U > 20$ , se considera bien graduado. Cuanto más uniforme es el suelo, más uniforme es el tamaño de sus huecos y más difícil es su compactación, al no existir una cierta variación de tamaños que rellenen adecuadamente los huecos.

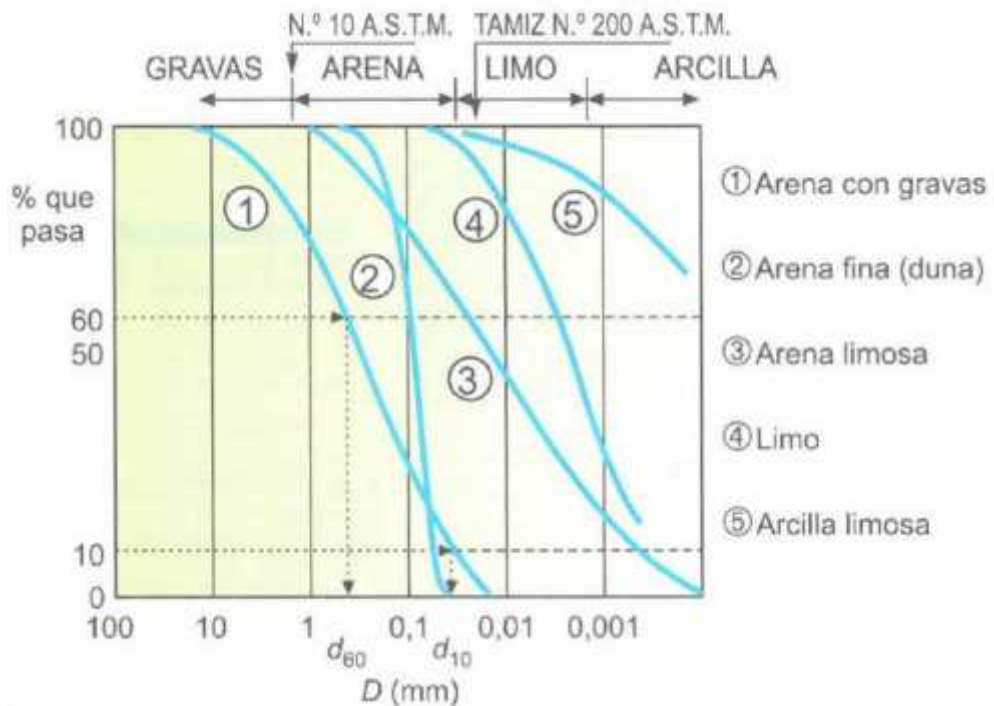
El coeficiente de curvatura, también llamado de graduación, ha de adoptar valores entre 1 y 3 para considerar al suelo bien graduado. Se determina dividiendo el cuadrado del diámetro correspondiente al tamiz por el que pasa un 30% del material, entre el producto de los diámetros correspondientes a los tamices por los que pasa un 60% y un 10% del material.

El análisis granulométrico por sedimentación (partículas de tamaño inferior a 0,08 mm.) se lleva a cabo con el hidrómetro, y se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que está aún en suspensión en cualquier tiempo dado,  $t$ . Así, con lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado puede calcularse y prepararse una gráfica de la distribución granulométrica.

Con los dos métodos de análisis granulométricos expuestos puede determinarse la curva granulométrica completa de una muestra de suelo (Figura 3.8). En función de la granulometría se clasifican los suelos en cuatro grandes grupos:

- Gravas, con tamaño de grano entre unos 80 mm. y 4,75 mm. Los granos son observables directamente, existen grandes huecos entre las partículas y no retienen el agua.
- Arenas, con partículas de tamaño entre 4,75 mm. y 0,075 mm. Estas son observables a simple vista y se mantienen inalterables en presencia de agua.
- Limos, con partículas comprendidas entre 0,075 mm. y 0,002 mm. Retienen el agua y si se forma una pasta limo-agua y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se aprecia cómo el agua se exhuda con facilidad.

- Arcillas, cuyas partículas tienen tamaños inferiores a 0,002 mm. Son partículas de tamaño gel y están formadas por minerales silicatados, constituidos por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, unidas por enlaces covalentes débiles y pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas, produciendo aumentos de volumen, a veces muy importantes. Por tanto, presentan una gran capacidad de retención de agua, con un porcentaje de huecos muy elevado (huecos pequeños pero con una gran superficie de absorción en las partículas). Debido a que el tamaño de los huecos es muy pequeño (aunque el índice de huecos es elevado), exhiben unos tiempos de expulsión de agua muy elevados y una permeabilidad muy baja.



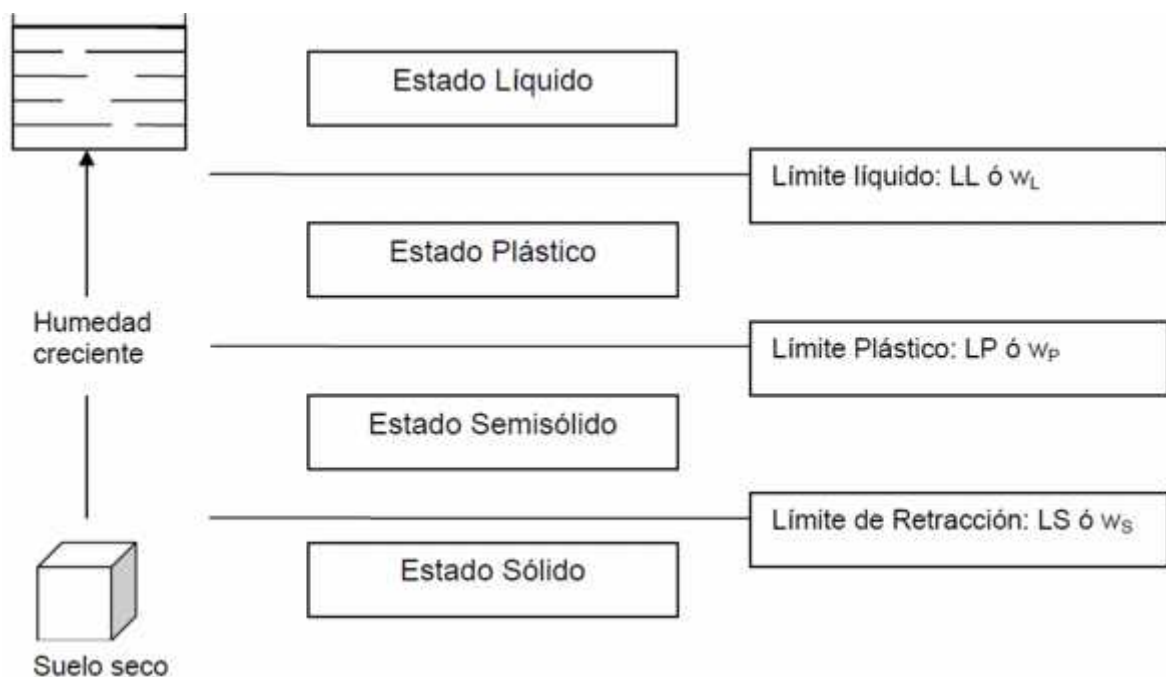
**FIGURA 3.8.- Curvas granulométricas de varios suelos.**

### 3.3.2 Plasticidad

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua.

Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan Límites de Atterberg. El concepto de que un suelo puede presentarse en varios estados, en función del contenido de humedad, se basa en que cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el comportamiento del suelo al de un líquido (Figura 3.9).

Esta variación de la consistencia en función de la humedad (plasticidad) es propia de suelos finos (arcillas y limos), ya que los suelos gruesos (arenas y gravas) no retienen agua y se mantienen inalterables en presencia de ésta.



**FIGURA 3.9.- Esquema del comportamiento de un suelo.**

La determinación de los Límites de Atterberg se lleva a cabo en laboratorio, definiéndose el límite plástico como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 3 mm. de diámetro. El límite líquido se determina con la cuchara de Casagrande.

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como Índice de Plasticidad.



humedad es mayor, situándose por encima de la línea A. Se definen, por tanto, varios tipos de suelos: arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL), limos y suelos orgánicos de alta plasticidad (MH-OH) y limos y suelos orgánicos de baja plasticidad (ML-OL).

### **3.3.3 Clasificación de suelos**

Con el objeto de dividir los suelos en grupos de comportamiento semejante, con propiedades geotécnicas similares, surgen las denominadas clasificaciones de suelos.

La clasificación de suelos consiste, pues, en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de muchos años de experiencia.

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para poderlo asignar a un determinado grupo. Las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la distribución granulométrica, los Límites de Atterberg, el contenido en materia orgánica, etc.

Los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos.

El sistema USCS clasifica los suelos en base a su granulometría, los Límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica. A continuación se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados.

### **3.3.4 Compactación**

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Se distingue de la consolidación de los suelos en que, en este último proceso el peso específico del material crece gradualmente bajo la acción natural de sobrecargas impuestas que provocan expulsión de agua por un proceso de difusión; ambos procesos involucran disminución de volumen, por lo que en el fondo son equivalentes.

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces se hace necesario compactar el terreno natural, como en el caso de cimentaciones sobre arenas sueltas. La estabilidad de una obra vial exige, entre otras cosas, que los terraplenes y las diferentes capas de rodamientos se hallen debidamente compactados.

A fin de que el material a compactarse alcance la mayor densidad posible en el terreno, deberá tener una humedad adecuada en el momento de la compactación. Esta humedad, previamente determinada en un laboratorio de suelos, se llama “humedad óptima” y la densidad obtenida se conoce con el nombre de “densidad máxima”.



**FIGURA 3.11.- Equipo para la realización del próctor T-99**

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en cada caso; los materiales puramente friccionantes,

como la arena, se compactan eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso. En la práctica, estas características se reflejan en los equipos disponibles para el trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos o “pata de cabra”. En las últimas épocas los equipos de campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas o pesos, de manera que el ingeniero tiene posibilidad de elegir entre muchos, los implementos adecuados a cada caso particular.

### **3.3.5 Densidad In Situ.**

El concepto básico se refiere a la medida de la densidad en el terreno. Esta puede hacerse extrayendo una muestra de la capa compactada y midiendo el volumen del hueco dejado por el material extraído.

Es sabido que la compactación se aplica a suelos con el fin de mejorar sus características de compresibilidad, relación esfuerzo-deformación y resistencia. Atendiendo al problema de compactación para la formación de estructuras para vías terrestres, que es uno de los usos más corrientes e importantes de los materiales compactados, las características de éstas pueden medirse con base en el laboratorio. Sin embargo, para verificar si el terreno que va a servir de capas del pavimento a construirse ha sido debidamente compactado, deben determinarse la densidad y la humedad del material, a fin de comparar estos resultados con la densidad máxima y la humedad óptima obtenidas previamente en laboratorio.

En las especificaciones de construcción, la calidad requerida del suelo compactado se fija generalmente en términos de la densidad seca máxima y no en función de la compresibilidad y resistencia que posea el material compactado; esto es debido tanto a cuestiones de orden práctico, de igual forma se exige un control del contenido de agua de los suelos durante la compactación.

Lo que se pretende al compactar un determinado suelo es mejorar artificialmente sus propiedades mecánicas por medios mecánicos.

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su densidad seca, disminuyendo sus vacíos, los métodos

usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en cada caso.

Por lo general, los requisitos de compactación en el campo se basan sobre una densidad seca de proyecto, obtenido en pruebas de laboratorio realizadas sobre el suelo de que se trata. El equipo a usarse para lograr la compactación dependerá de tal valor de proyecto y del contenido de agua natural del suelo en los bancos en que se extraiga y además claro es, del tipo de suelo en sí. Teóricamente el material habrá de compactarse con la humedad óptima correspondiente a la densidad deseado, obtenida en laboratorio. Para ello a veces puede ser necesario añadir agua al material en el banco, en tanto que otras veces será preciso secar éste.

Para verificar si el terreno que va a servir de capa del pavimento a construirse ha sido debidamente compactado, deben determinarse la densidad y la humedad del material, a fin de comparar estos resultados con la densidad máxima y la humedad óptima obtenidas previamente en laboratorio.

Para realizar el control de compactación en la obra, es decir, determinar la densidad en el terreno, esto puede realizarse extrayendo una muestra de la capa compactada y midiendo el volumen del hueco dejado por el material extraído.

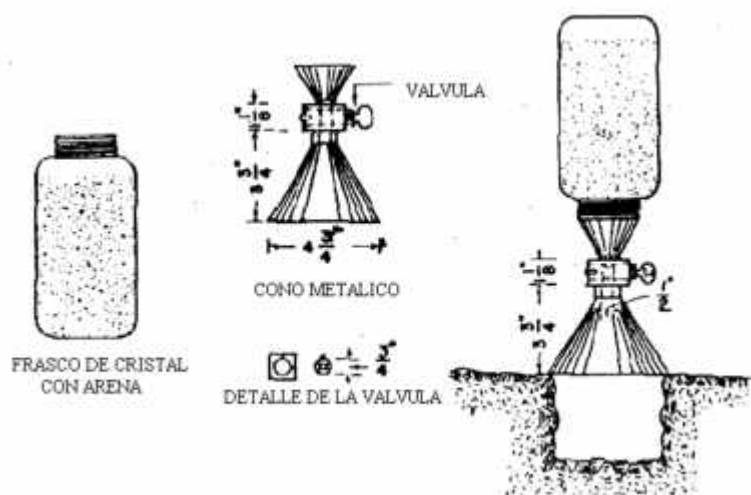
Existen varios métodos para lograr tal fin, como ser:

- a) Método del aceite.
- b) Método volumétrico.
- c) Método de saca-muestras.
- d) Método de la arena.
- e) Método nuclear.

El método de la arena representa una forma indirecta de obtener el volumen del hueco. La arena utilizada (a menudo arena de Ottawa) es generalmente material que pasa el tamiz No 20 y está retenido en el No 30, generalmente es deseable utilizar una arena uniforme o de “un solo tamaño” para evitar problemas de segregación.

El aparato de cono de arena más comúnmente usado, utiliza un recipiente de arena plástico o de vidrio de 3785 cm<sup>3</sup> (1 galón) con suficiente materia para llenar un hueco y el respectivo cono, no mayor de 3800 cm<sup>3</sup>.

Por lo expuesto hasta aquí resulta lógico esperar que en el campo no se logre



precisamente la densidad seca máxima indicado por las pruebas de laboratorio. Se define como grado de compactación de un suelo compactado la relación, en porcentaje, entre la densidad seca obtenida en la obra, y el máximo especificado en el laboratorio para tal obra. El control de la obra se lleva generalmente investigando el grado de compactación de los materiales ya compactados y estableciendo un mínimo aceptable, que varía según la importancia y función de la obra.

**FIGURA 3.12.- Densidad In Situ, mediante el método de la arena.**

### 3.4 CUANTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS.

La información necesaria para la elaboración de este trabajo fue obtenida por el autor en su totalidad, para la recopilación de esta se hace uso de la hidrometría que es la ciencia que trata la medición y análisis del agua incluyendo métodos, técnicas e instrumentos utilizados en la hidrología; para un mejor entendimiento del procedimiento de cálculo el autor plantea una breve explicación de los pasos que se llevaron a cabo para la cuantificación de las pérdidas (evaporación e infiltración), los cuales son similares a los que realiza el SENAHMI.

#### 3.4.1 Linnímetro.

El limnómetro no es más que una regla graduada que permite medir las fluctuaciones del nivel del agua, como muestra la Figura 3.13, las características principales con las que debe contar un limnómetro son las siguientes:

- a) Deben ser precisos y estar claramente graduados.
- b) Deben ser resistentes a la corrosión y de fácil mantenimiento.
- c) Deben ser fáciles de instalar y utilizar.
- d) Las graduaciones deben ser claras y permanentes. Los números deben ser claramente legibles y estar situados de manera que no haya ninguna posibilidad de ambigüedad.



**FIGURA 3.13.- Ubicación del limnómetro.**

#### **3.4.2 Tanque Evaporímetro.**

El método del tanque evaporímetro ha sido utilizado extensivamente en las áreas de riego, cuando no se tiene suficiente información climática.

El tanque evaporímetro más conocido es el tipo “A”; este tanque es de tipo circular, tiene un diámetro de 121 cm, una profundidad de 30 cm y el nivel del agua se mantiene 6 a 8 cm debajo del borde. El tanque está construido de hierro galvanizado y está montado 15 cm arriba de la superficie del suelo sobre una tarima.



**FIGURA 3.14.- Ubicación del tanque evaporímetro.**

### **3.4.3 Procesamiento de la información.**

Una vez que se ha hecho la respectiva toma de datos en campo se procede al procesamiento de la información para determinar las pérdidas en los distintos reservorios, para esto se realizaron unas hojas electrónicas en el MICROSOFT EXCEL, que se encuentran en el [Anexo III](#).

### **3.5 DISEÑO Y CÁLCULOS MÉTRICOS DE LOS RESERVORIOS.**

Para poder realizar una comparación de los precios de construcción de los distintos reservorios con y sin impermeabilización, asumiremos que se construirán cuatro reservorios los mismos que tendrán una capacidad de 500, 1000, 2000 y 3000 m<sup>3</sup>.

Las actividades o ítems necesarios para la construcción de un reservorio se los muestra en la Tabla 3.2., y sus precios unitarios se encuentran en el [Anexo IV](#).

<b>Ítem</b>	<b>Actividad</b>	<b>Unidad</b>
1	Limpieza y desbroce	m <sup>2</sup>
2	Replanteo y trazado de reservorios	Pza.
3	Excavación con maquinaria	m <sup>3</sup> .
4	Relleno y compactación de terraplenes	m <sup>3</sup> .

5	Provisión y colocación geo-membrana impermeabilizante	m <sup>2</sup> .
6	Hormigón ciclópeo 40% P.D.	m <sup>3</sup> .

**TABLA 3.2.- Lista de actividades necesarias para la construcción de un reservorio con y sin impermeabilización.**

Para el diseño de un reservorio se debe contar con algunos datos obtenidos en campo (altura de diseño, altura muerta, talud interior y exterior, pendiente del terreno, esponjamiento, coronamiento), los mismos que se asumirán constantes para los reservorios que se diseñaran, esto para poder determinar la incidencia del material de recubrimiento en el costo final, para esto el autor propuso el uso de un paquete computacional que recibe el nombre de DISEÑO GEOMÉTRICO Y CÁLCULO DE MOVIMIENTO DE TIERRAS PARA ATAJADOS el cual se describe a continuación:

DISEÑO GEOMÉTRICO Y CÁLCULO DE MOVIMIENTO DE TIERRAS PARA ATAJADOS es un software completo y de fácil manejo, que permite realizar el diseño geométrico de un reservorio de agua, muestra una tabla con coordenadas de los puntos más importantes y además genera un dibujo del reservorio visto en planta y de perfil.

Para la realización de un diseño, el paquete computacional DISEÑO GEOMÉTRICO Y CÁLCULO DE MOVIMIENTO DE TIERRAS PARA ATAJADOS realiza el siguiente procedimiento:

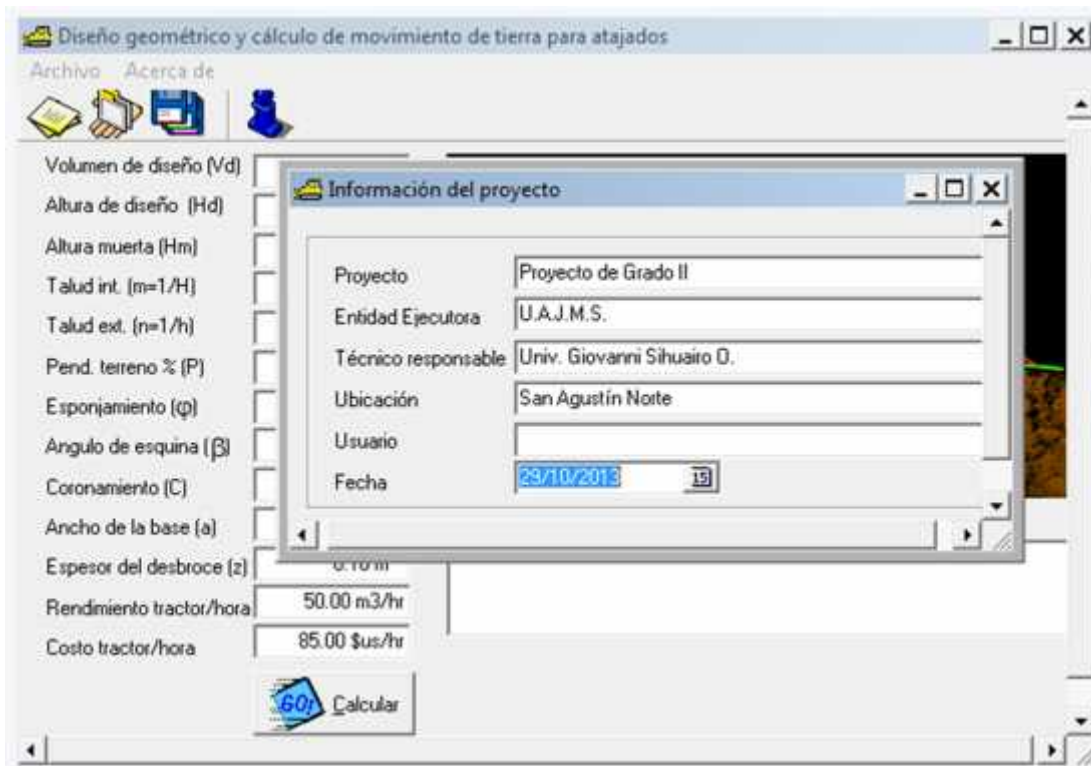
1. En pantalla principal del DISEÑO GEOMÉTRICO Y CÁLCULO DE MOVIMIENTO DE TIERRAS PARA ATAJADOS, ingresamos los datos obtenidos en campo, que como se mencionó anteriormente serán constantes para



todos los reservorios, como muestra la Figura 3.15.

**FIGURA 3.15.- Pantalla principal del DISEÑO GEOMÉTRICO Y CÁLCULO DE MOVIMIENTO DE TIERRAS PARA ATAJADOS**

2. Para realizar el cálculo correspondiente primero debemos seleccionar el volumen de diseño que en este caso será de 500 m<sup>3</sup>., luego ingresamos a “información” lo cual nos desplegará una pantalla como muestra la Figura 3.16 en donde debemos ingresar los datos generales para identificar el proyecto, la entidad ejecutora, el técnico responsable, su ubicación y la fecha que se realizó el diseño.



**FIGURA 3.16.- Pantalla de información del Proyecto.**

3. A continuación se procede a seleccionar la opción “calcular” (Figura 3.17) la cual luego de un momento nos abrirá otra ventana en la cual nos mostrará los resultados, las coordenadas de puntos críticos, la vista en planta y perfil del reservorio, esto se puede observar en la Figura 3.18.

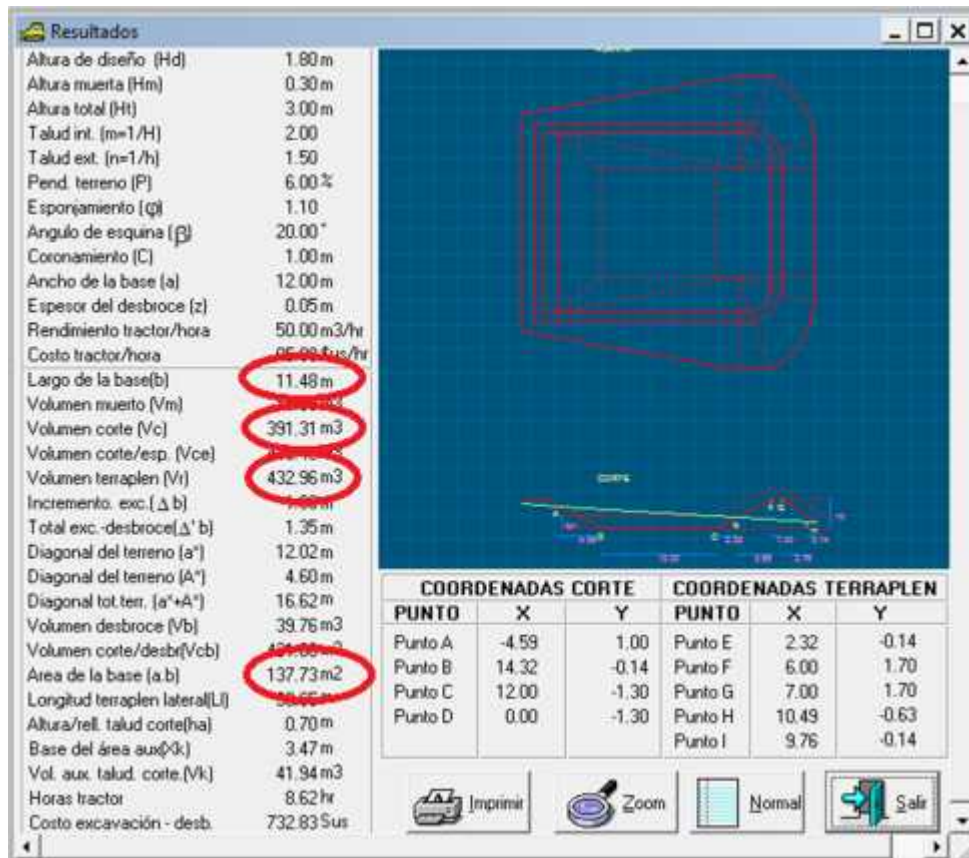
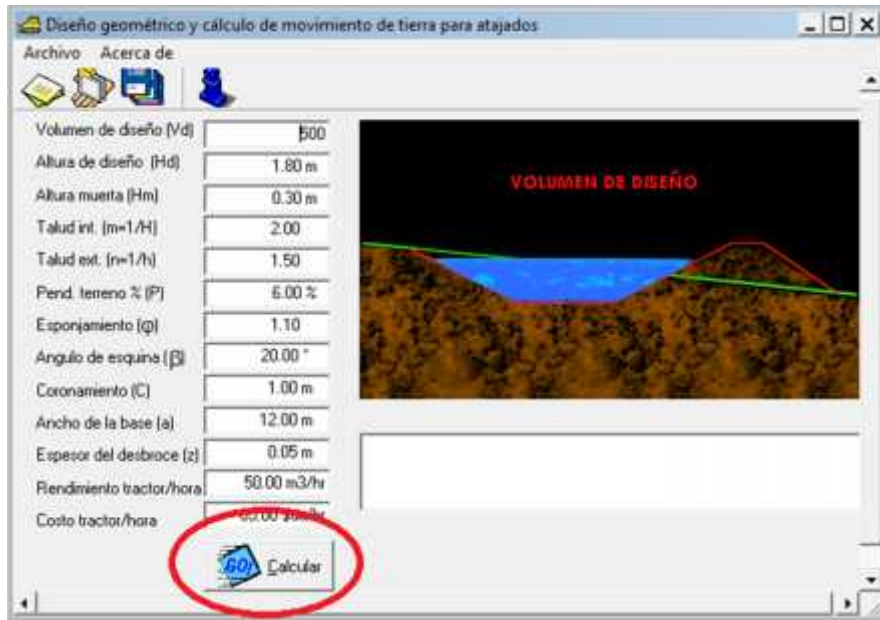


FIGURA 3.17.- Ubicación del comando “calcular”

**FIGURA 3.18.- Ventana en donde se muestran los resultados, coordenadas, vistas en planta y perfil del reservorio.**

4. Finalmente en la ventana de resultados, los que son de nuestro interés para los cálculos métricos se encuentran remarcados con un círculo de color rojo.

Ítem	Actividad	Unidad	500 m3.	1000 m3.	2000 m3.	3000 m3.
1	Limpieza y desbroce	m2	137,73	348,86	809,55	1292,90
2	Replanteo y trazado de reservorios	Pza.	1,00	1,00	1,00	1,00
3	Excavación con maquinaria	m3.	391,31	706,59	1246,75	1746,17
4	Relleno y compactación de terraplenes	m3.	432,96	772,55	1364,62	1909,99

**TABLA 3.3.- Resumen de cálculos métricos obtenidos mediante el paquete computacional.**

#### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para el análisis de resultados se procedió a separar los datos en tres grupos, el primero los que componen las pérdidas por evaporación, el segundo grupo comprenderá las pérdidas por infiltración y el tercer grupo lo componen los precios unitarios para la construcción de cada reservorio. Para esto es necesario realizar gráficas y correlaciones; y para la obtención de esta es necesario hacer uso del coeficiente de Pearson, el mismo que se describe a continuación.

##### **Coefficiente de correlación de Pearson.**

Para determinar el grado de correlación entre las variables propuestas (temperatura máxima, evaporación, infiltración) se hizo uso del coeficiente de correlación de Pearson, “r”, el cual permite saber si el ajuste de la nube de puntos a la curva de regresión obtenida es satisfactorio. Se define como el cociente entre la covarianza y el producto de las desviaciones típicas (raíz cuadrada de las varianzas).

$$r = \frac{V_{xy}}{V_x \cdot V_y} = \frac{S_{xy}}{S_x^2 \cdot S_y^2} = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (4.1)$$

Teniendo en cuenta el valor de la covarianza y las varianzas, se puede evaluar mediante cualquiera de las dos expresiones siguientes:

$$r = \frac{\frac{\sum x_i \cdot y_i}{n} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2 \cdot \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2} \quad (4.2)$$

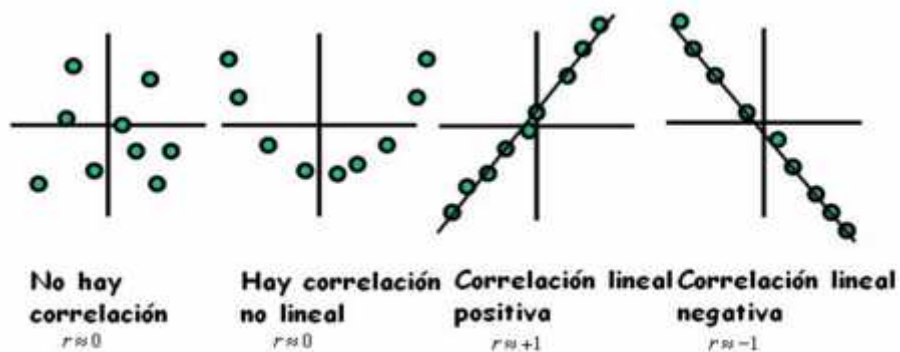
$$r = \frac{n \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i^2 \cdot n \sum y_i^2 - \sum y_i^2} \quad (4.3)$$

##### **Propiedades del coeficiente de correlación de Pearson.**

Sus propiedades son las siguientes:

- El coeficiente de correlación, “r”, presenta valores entre -1 y +1.
- Cuando “r” es próximo a 0, no hay correlación entre variables. La nube de puntos esta muy dispersa o bien no es una curva adecuada para la nube de puntos.
- Cuando “r” es cercano a +1, hay una buena correlación positiva entre variables según el modelo escogido y la curva de regresión que se determine tendrá pendiente positiva, será creciente.
- Cuando “r” es cercano a -1, hay una buena correlación negativa entre variables según el modelo escogido y la curva de regresión que se determine tendrá pendiente negativa, será decreciente.

La Figura 2.7 muestra un ejemplo de correlación lineal.

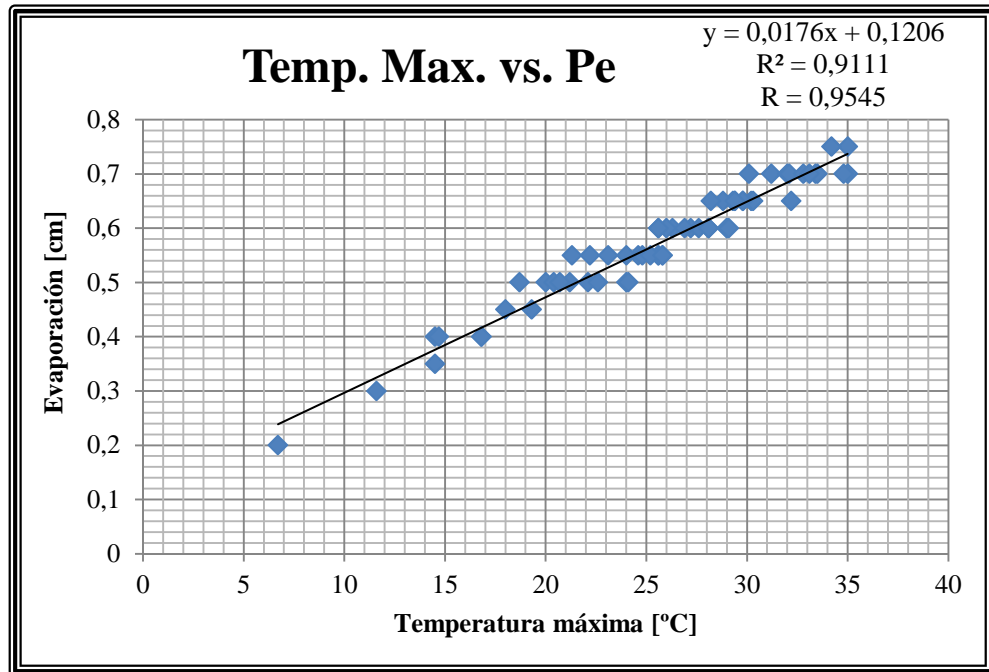


**FIGURA 4.1.- Representación gráfica de una correlación lineal.**

#### **4.1.1 Análisis de correlaciones de las pérdidas por evaporación.**

Con el fin de poder entender y visualizar mejor el comportamiento de las variables estudiadas se trazaron una serie de gráficas y curvas de calibración en función de los resultados obtenidos, estas gráficas son la relación existente entre la temperatura máxima de la zona objeto de estudio y las pérdidas por evaporación en el tanque evaporímetro tipo A, en el reservorio recubierto con geo-membrana y en el de hormigón ciclópeo, las cuales se muestran a continuación:

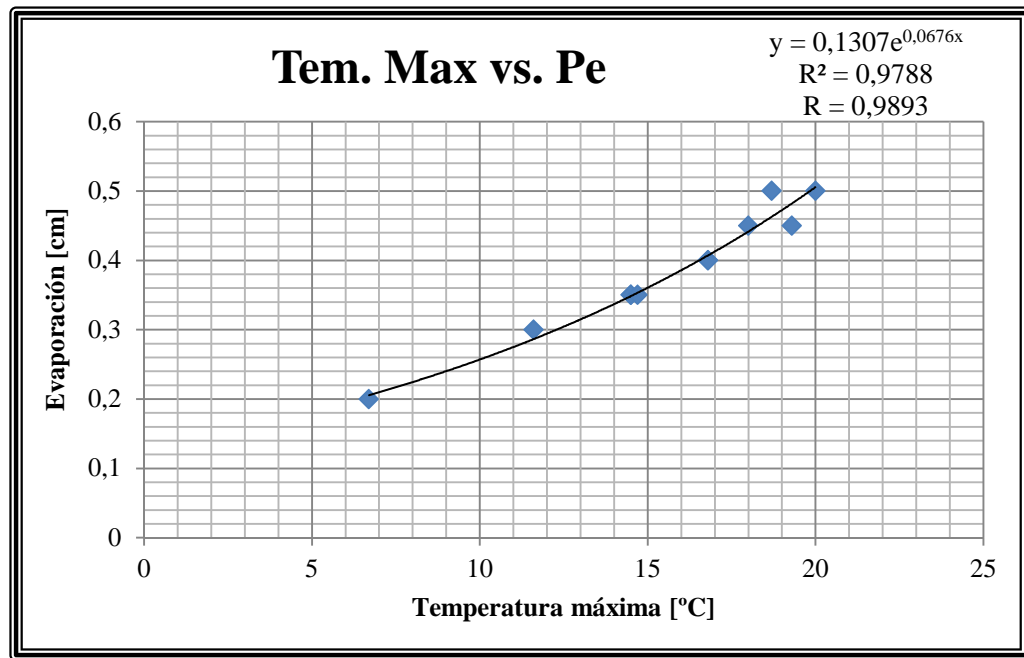
#### 4.1.1.1 Pérdidas por evaporación en el tanque evaporímetro en función de la temperatura máxima.



**GRÁFICA 4.1.-** Curva de comportamiento “Temperaturas máximas vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al tanque evaporímetro.

La Gráfica 4.1 muestra la relación existente entre la temperatura máxima de la zona y las pérdidas por evaporación, esta se calibra con mayor precisión a una recta lineal la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 95,45%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,2 cm. y llega a valores de 0,75 cm.; al observar esta gráfica se hace evidente el aumento de las pérdidas por evaporación, es decir que a medida que aumenta la temperatura máxima las pérdidas por evaporación también van aumentando. También se hace notar que la línea de tendencia no se adecua de buena forma en temperaturas bajas, por lo que se sugirió separar la misma, obteniendo así los siguientes gráficos.

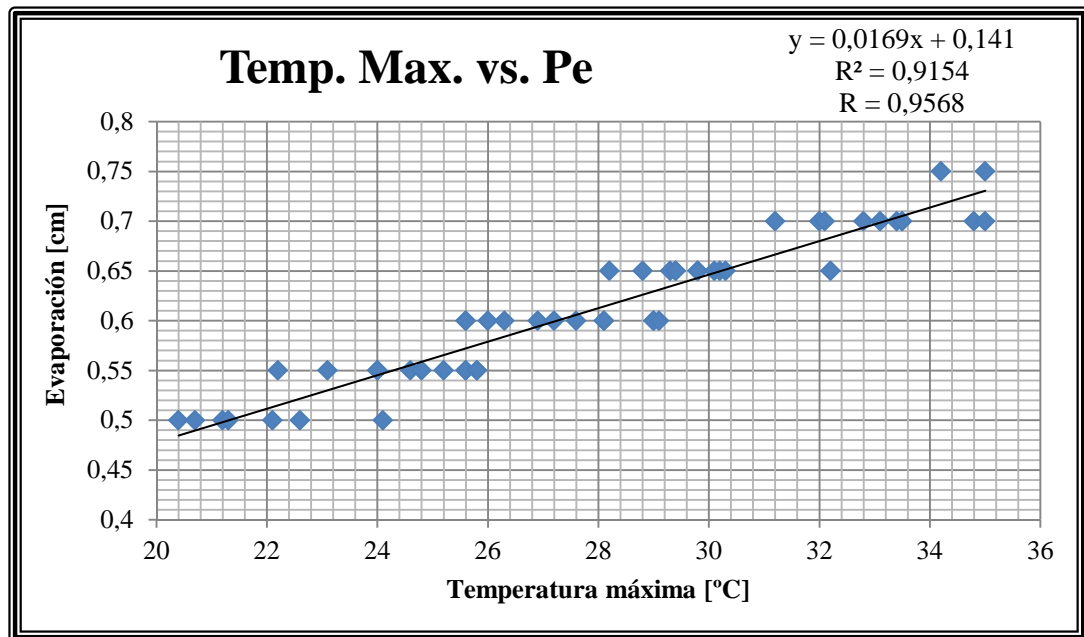
**4.1.1.1.1 Pérdidas por evaporación en el tanque evaporímetro en función de la temperatura máxima entre los 0 y los 20 °C.**



**GRÁFICA 4.2.- Curva de comportamiento “Temperaturas máximas entre los 0 y 20°C. vs. Perdidas por evaporación” correspondiente al tanque evaporímetro.**

La Gráfica 4.2 muestra que para temperaturas máximas entre los 0 y los 20 °C, se calibra con mayor precisión a una recta curva exponencial la cual como se muestra en la gráfica, se ajusta con coeficiente de correlación del 98,93%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,20 cm. y llega a valores de 0,50 cm.

#### 4.1.1.1.2 Pérdidas por evaporación en el tanque evaporímetro en función de la temperatura máxima mayor a los 20 °C.

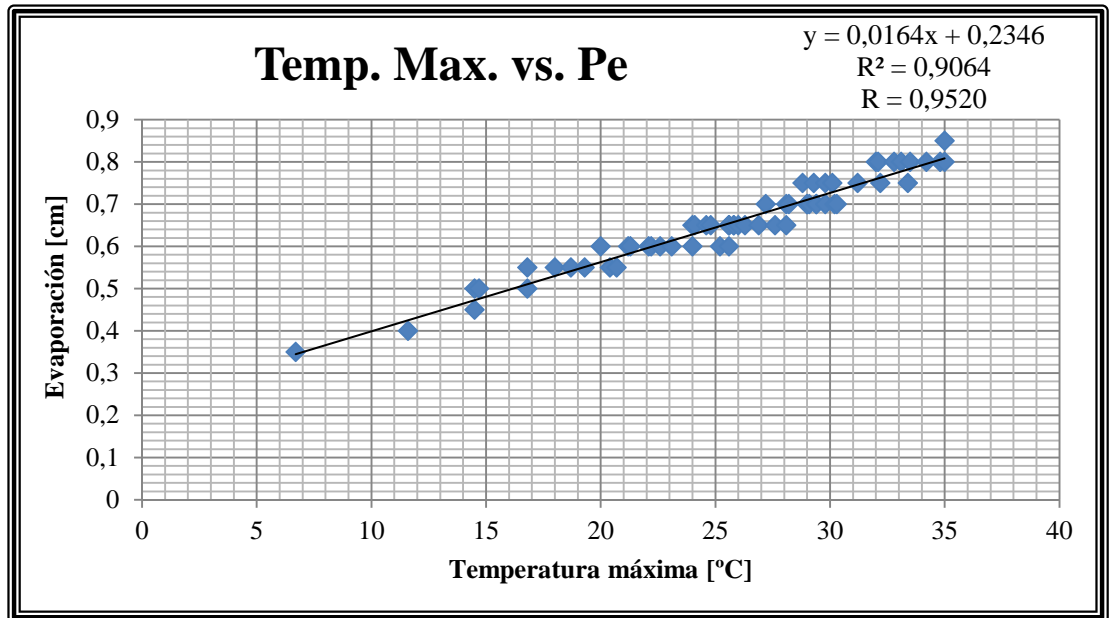


**GRÁFICA 4.3.- Curva de comportamiento “Temperaturas Máximas mayores a 20°C. vs. Pérdidas por Evaporación” correspondiente al tanque evaporímetro.**

La Gráfica 4.3 muestra que para temperaturas máximas mayores a los 20 °C, se calibra con mayor precisión a una recta lineal la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 95,68%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,50 cm. y llega a valores de 0,75 cm.

Como se observa en la Gráfica 4.3 existen pérdidas por evaporación iguales para distintas temperaturas máximas, estos puntos pueden ser el resultado de errores de apreciación cometidos por el autor en la recolección de datos, ya que los mismos son del orden de la milésima parte de un centímetro, los cuales son muy difíciles de apreciar a simple vista.

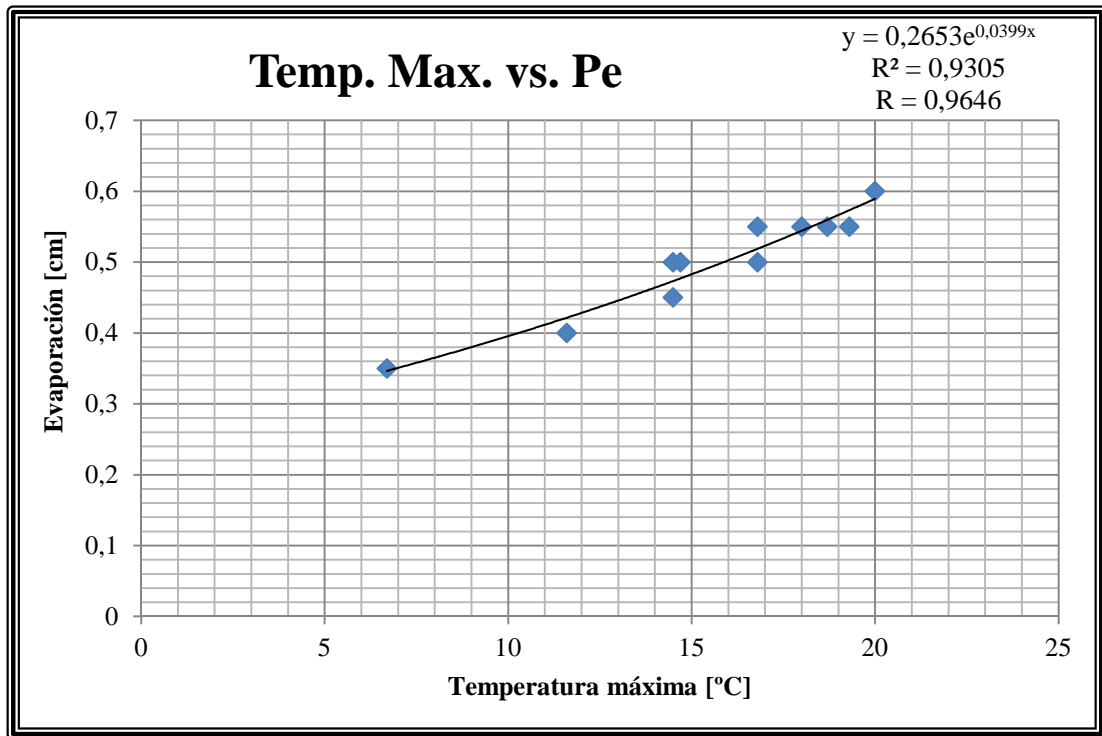
**4.1.1.2 Pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con geo-membrana en función de la temperatura máxima.**



**GRÁFICA 4.4.- Curva de comportamiento “Temperaturas máximas vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al reservorio impermeabilizado con geo-membrana.**

La Gráfica 4.4 muestra la relación existente entre la temperatura máxima de la zona y las pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con geo-membrana, esta se calibra con mayor precisión a una recta lineal la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 95,20%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,35 cm. y llega a valores de 0,85 cm.; al observar esta gráfica se hace evidente el aumento de las pérdidas por evaporación, es decir, a medida que aumenta la temperatura máxima las pérdidas por evaporación también van aumentando. También se hace notar que al igual que en la Figura 4.1 la línea de tendencia no se adecua de buena forma en temperaturas bajas, por lo que se sugirió nuevamente separar la misma, obteniendo así los siguientes gráficos.

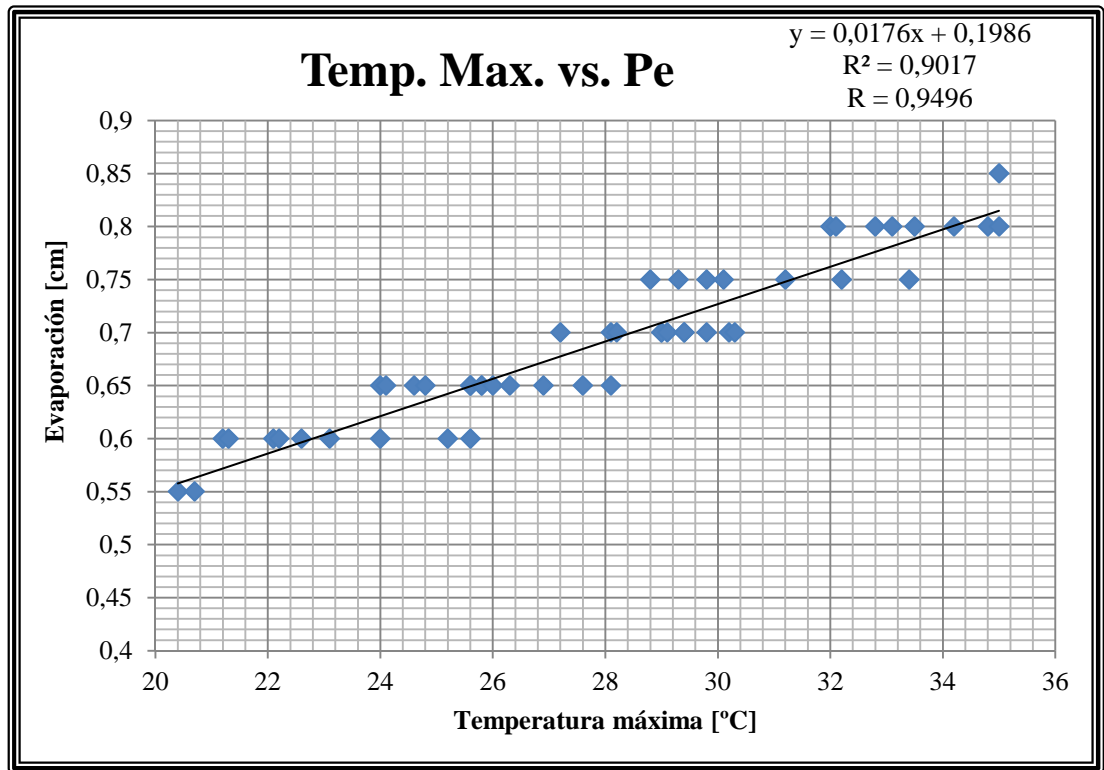
**4.1.1.2.1 Pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con geo-membrana en función de la temperatura máxima entre los 0 y los 20 °C.**



**GRÁFICA 4.5.- Curva de comportamiento “Temperaturas máximas entre los 0 y 20°C. vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al reservorio impermeabilizado con geo-membrana.**

La Gráfica 4.5 muestra que para temperaturas máximas entre los 0 y los 20 °C, se calibra con mayor precisión a una recta curva exponencial la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 96,46%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,35 cm. y llega a valores de 0,60 cm.

**4.1.1.2.2 Pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con geo-membrana en función de la temperatura máxima mayor a los 20 °C.**

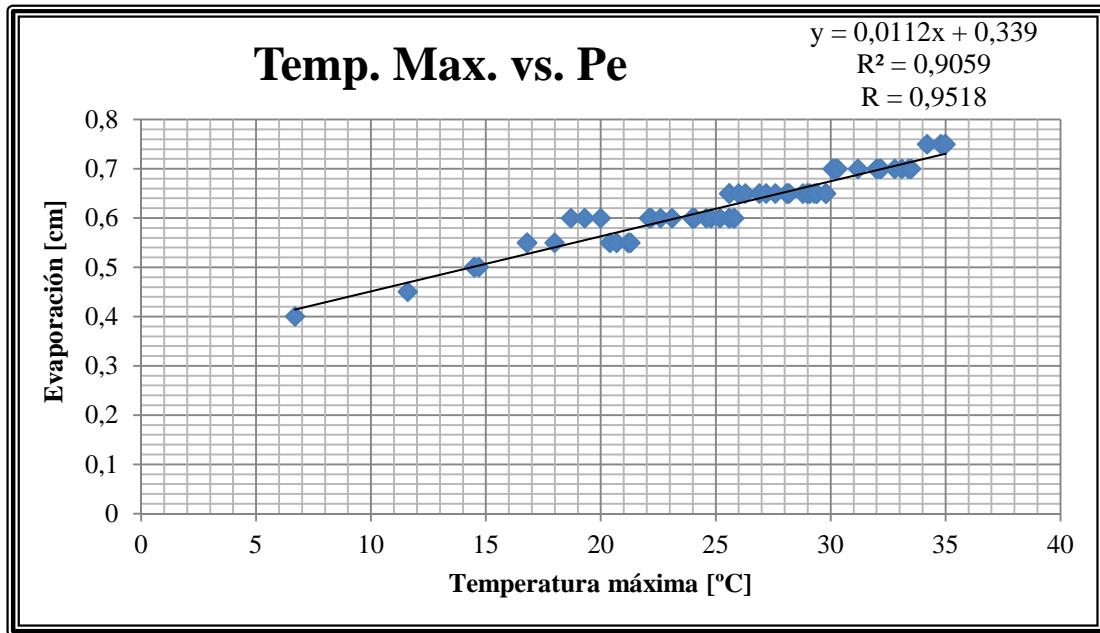


**GRÁFICA 4.6.- Curva de comportamiento “Temperaturas máximas mayores a 20°C. vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al reservorio impermeabilizado con geo-membrana.**

La Gráfica 4.6 muestra que para temperaturas máximas mayores a los 20 °C, se calibra con mayor precisión a una recta lineal la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 94,96%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,55 cm. y llega a valores de 0,85 cm.

Como en la comparación anterior en esta también se observa que en la Grafica 4.6 existen pérdidas por evaporación iguales para distintas temperaturas máximas, y como ya se mencionó estos puntos pueden debido a errores de apreciación cometidos por el autor en la recolección de datos.

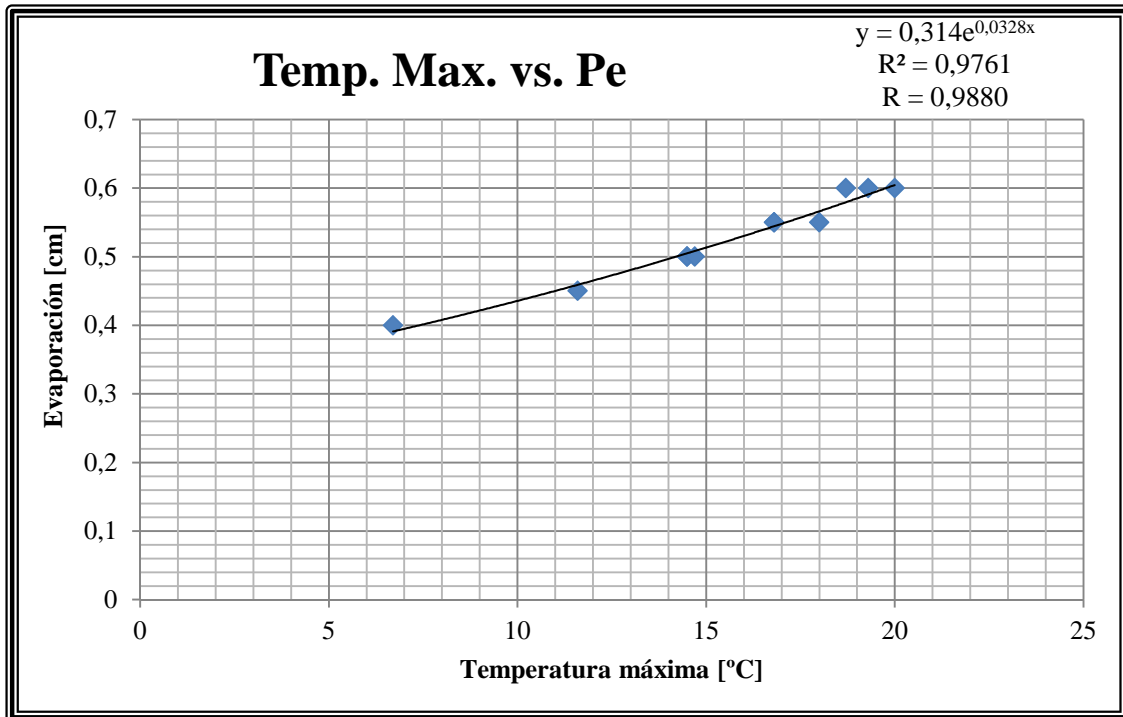
#### 4.1.1.3 Pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con hormigón ciclópeo.



**GRÁFICA 4.7.-** Curva de comportamiento “Temperaturas máximas vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al reservorio impermeabilizado con hormigón ciclópeo.

La Gráfica 4.7 muestra la relación existente entre la temperatura máxima de la zona y las pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con hormigón ciclópeo, esta se calibra con mayor precisión a una recta lineal la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 95,18%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,40 cm. y llega a valores de 0,75 cm.; al observar esta gráfica se hace evidente el aumento de las pérdidas por evaporación, es decir, a medida que aumenta la temperatura máxima las pérdidas por evaporación también van aumentando. También se hace notar que al igual que en comparaciones anteriores la línea de tendencia no se adecua de buena forma en temperaturas bajas, por lo que se sugirió nuevamente separar la misma, obteniendo así los siguientes gráficos.

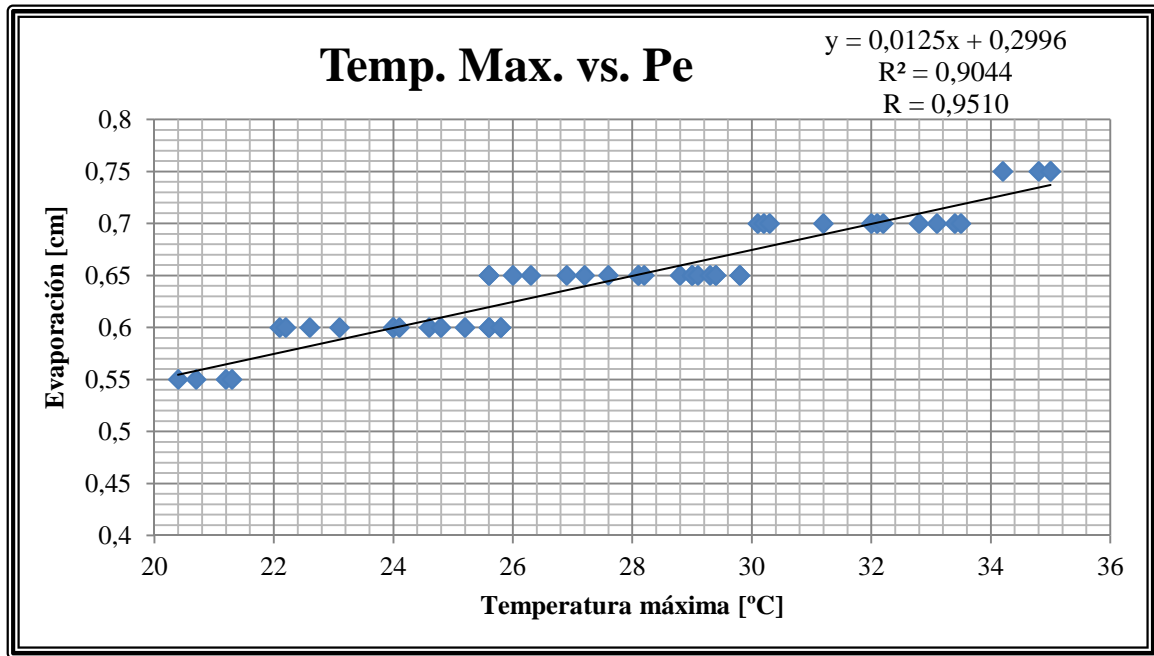
**4.1.1.3.1 Pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con hormigón ciclópeo en función de la temperatura máxima entre los 0 y los 20 °C.**



**GRÁFICA 4.8.- Curva de comportamiento “Temperaturas máximas entre los 0 y 20°C. vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al reservorio impermeabilizado con hormigón ciclópeo.**

La Gráfica 4.8 muestra que para temperaturas máximas entre los 0 y los 20 °C, se calibra con mayor precisión a una recta curva exponencial la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 98,80%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,40 cm. y llega a valores de 0,60 cm.

#### 4.1.1.3.2 Pérdidas por evaporación en el reservorio recubierto con hormigón ciclópeo en función de la temperatura máxima mayor a los 20 °C.



**GRÁFICA 4.9.- Curva de comportamiento “Temperaturas máximas mayores a 20°C. vs. Pérdidas por evaporación” correspondiente al reservorio impermeabilizado con hormigón ciclópeo.**

La Gráfica 4.9 muestra que para temperaturas máximas mayores a los 20 °C, se calibra con mayor precisión a una recta lineal la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 95,10%, esta gráfica es del tipo creciente y en ella se puede observar que las pérdidas por evaporación “Pe” parte con valores bajos de hasta 0,55 cm. y llega a valores de 0,75 cm.

Como en la comparación anterior en esta también se observa que en la grafica 4.9 existen pérdidas por evaporación iguales para distintas temperaturas máximas, y nuevamente se menciona que estos puntos pueden debido a errores de apreciación cometidos por el autor en la recolección de datos.

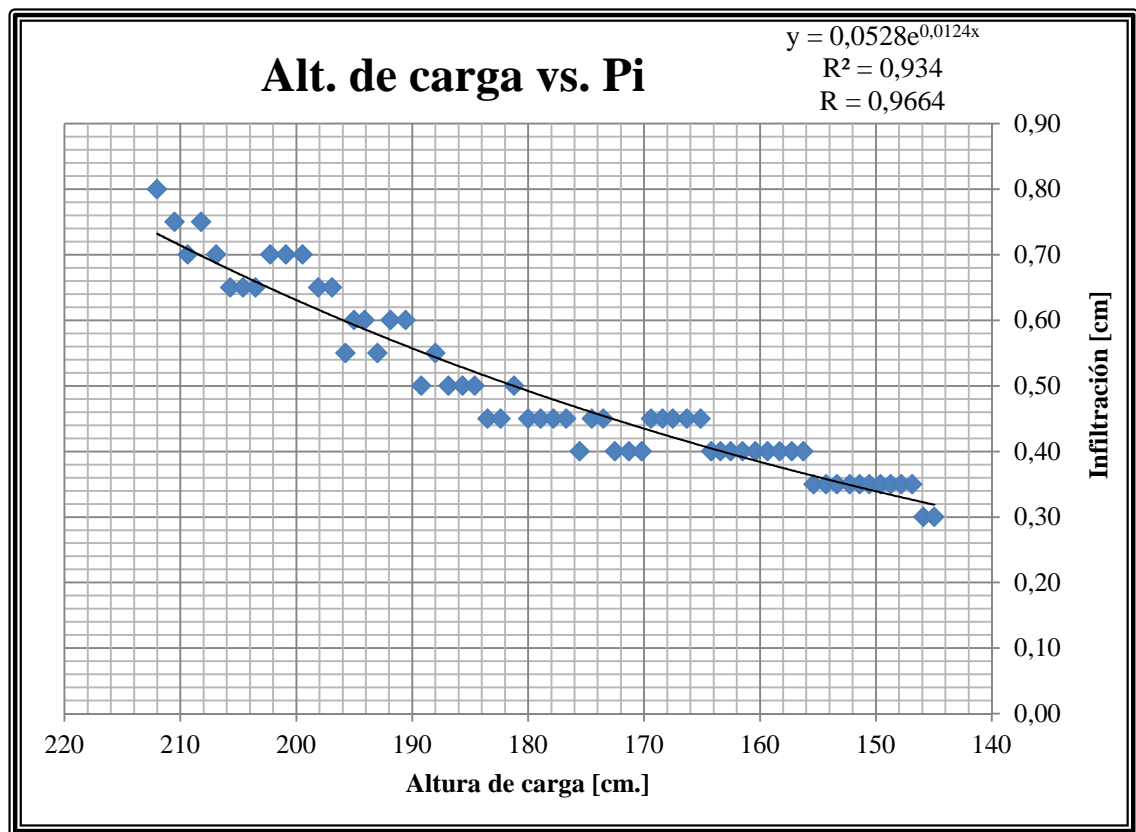
Como se pudo observar en las gráficas anteriores, se pudo evidenciar que las tendencias de las gráficas de pérdidas por evaporación son similares tanto para el tanque evaporímetro, el reservorio revestido con geo-membrana y el de hormigón ciclópeo, siendo éstas un poco mayores en el de geo-membrana, esto posiblemente debido a que su espejo de agua es mayor que el de los otros dos.

#### **4.1.2 Análisis de correlaciones de las pérdidas por infiltración.**

Seguidamente, al igual que en el anterior punto, con el fin de poder entender y visualizar mejor el comportamiento de las pérdidas por infiltración se trazaron una serie de gráficas y curvas de calibración en función de los resultados obtenidos, estas gráficas son la relación existente entre la altura de carga de cada reservorio objeto de estudio y las pérdidas por infiltración, para poder lograr esto se deben asumir dos hipótesis:

1. Para poder separar las pérdidas por evaporación e infiltración en los reservorios, se asumirá que las pérdidas por evaporación serán iguales a las obtenidas en el evaporímetro, por lo que para obtener las pérdidas por infiltración sólo será necesario restar las pérdidas del reservorio menos las del evaporímetro.
2. Se asumirá que las pérdidas por infiltración son mínimas en los reservorios impermeabilizados con geo-membrana y hormigón ciclópeo, tomando como pérdidas por infiltración solo a la diferencia de estos reservorios con las pérdidas del tanque evaporímetro, por lo que solo se realizarán gráficas para el reservorio impermeabilizado con arcilla compactada y para el que no presenta ningún tipo de impermeabilización.

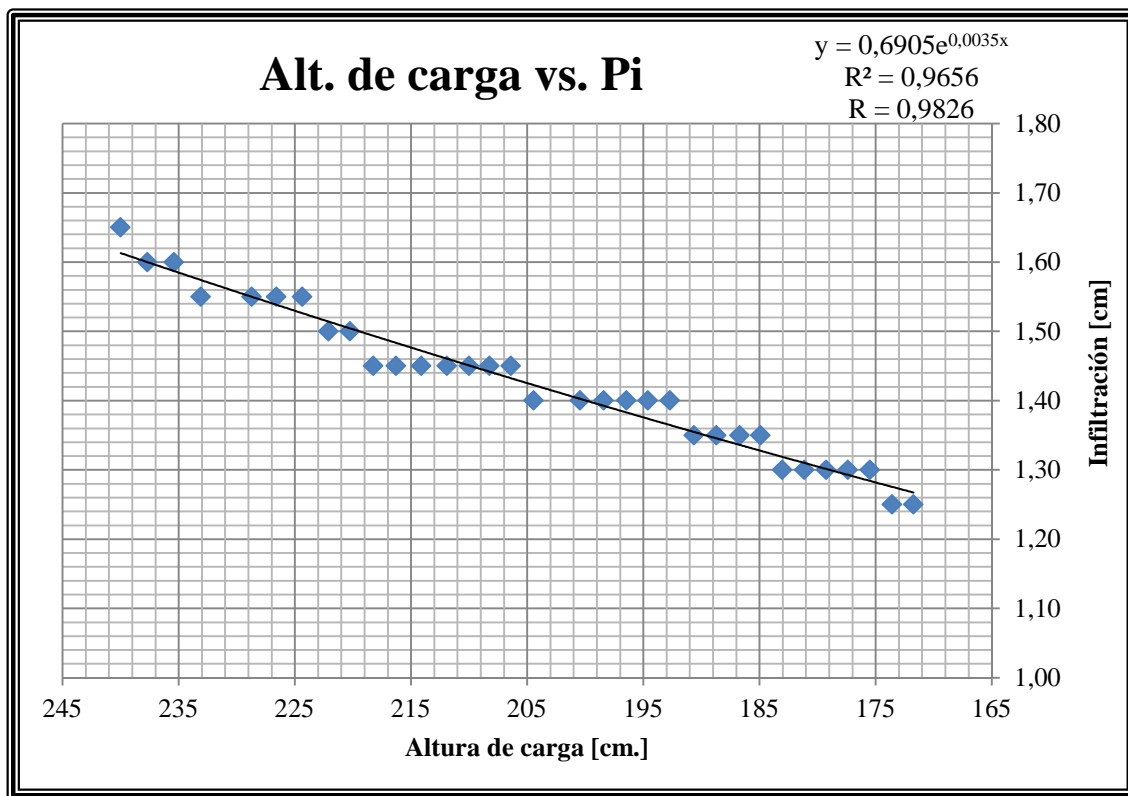
#### 4.1.2.1 Pérdidas por infiltración en el reservorio impermeabilizado con arcilla compactada.



**GRÁFICA 4.10.-** Curva de comportamiento “Altura de carga. vs .Pérdidas por infiltración” correspondiente al reservorio impermeabilizado con arcilla compactada.

La Gráfica 4.10 muestra la relación existente entre la altura de carga del reservorio y las pérdidas por infiltración en el reservorio recubierto con arcilla compactada, esta se calibra con mayor precisión a una curva exponencial la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 96,64%, esta gráfica es del tipo decreciente y en ella se puede observar que las pérdidas por infiltración “Pi” parte con valores altos de hasta 0,80 cm. y llega a valores de 0,30 cm.; al observar esta gráfica se hace evidente la disminución de las pérdidas por infiltración, es decir, a medida que reduce la altura de carga las pérdidas por infiltración también van disminuyendo.

#### 4.1.2.2 Pérdidas por infiltración en el reservorio sin impermeabilización.



**GRÁFICA 4.11.-** Curva de comportamiento “Altura de carga vs. Pérdidas por infiltración” correspondiente al reservorio sin impermeabilización.

La Gráfica 4.11 muestra la relación existente entre la altura de carga del reservorio y las pérdidas por infiltración en el reservorio sin impermeabilización, esta se calibra con mayor precisión a una curva exponencial la cual como se muestra en la gráfica se ajusta con coeficiente de correlación del 98,26%, esta gráfica es del tipo decreciente y en ella se puede observar que las pérdidas por infiltración “Pi” parte con valores altos de hasta 1,75 cm. y llega a valores de 1,25 cm.; al observar esta gráfica al igual que en la anterior se hace evidente la disminución de las pérdidas por infiltración, es decir, a medida que reduce la altura de carga las pérdidas por infiltración también van disminuyendo.

La diferencia entre la Gráfica 4.10 y la Gráfica 4.11 es que los valores de pérdidas por infiltración en el reservorio sin impermeabilización en algunos casos llegan a ser el doble de las del reservorio impermeabilizado con arcilla compactada, por lo cual el agua almacenada se pierde casi en su totalidad antes de poder ser utilizada con algún otro fin.

#### 4.1.3 Análisis del costo de construcción de reservorios impermeabilizados con distintos materiales.

Para el análisis de esta variable, el autor propuso diseñar cuatro reservorios, los mismos que tendrán una capacidad de 500, 1000, 2000 y 3000 m<sup>3</sup>, y se impermeabilizarán con distintos materiales, el presente análisis solo contempla la primera fase de inversión que vendría a ser su construcción; y no así una segunda fase de operación y mantenimiento debido a que estos serán realizados por el propietario o en su caso el beneficiario de los reservorios. Resultado de este análisis se muestra en la Tabla 4.1 y sus respectivos cómputos métricos se encuentran en el [Anexo V](#).

Capacidad [m <sup>3</sup> .]	Costo Construcción Reservorios [Bs.]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo
500	19 635,21	27 427,84	75 930,94	101 754,73
1000	32 808,29	49 058,51	131 350,60	179 515,38
2000	54 379,40	86 664,14	231 602,29	322 738,71
3000	74 592,66	121 510,46	326 139,15	459 180,86

**TABLA 4.1.- Costo de construcción de reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

#### 4.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

Para realizar la comparación se proponen distintas tablas en donde se podrá observar los valores y porcentajes de pérdidas en los distintos reservorios.

#### 4.2.1 Comparación de las pérdidas por evaporación.

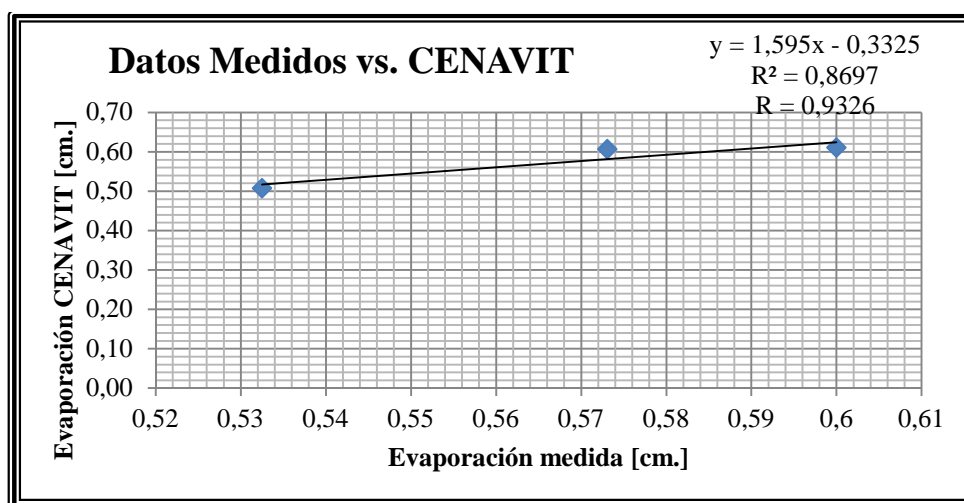
Primeramente, antes de comparar los valores que se midieron en el evaporímetro con los que se calculó mediante las ecuaciones deducidas, se verificará y validará los datos medidos, esto se lo realizará haciendo una comparación entre las medias medidas de cada mes y las medias de los mismos meses de una estación cercana, en este caso será la de CENAVIT (**Anexo VI**). Se decidió usar esta estación debido a que es una de las pocas estaciones en nuestro departamento que cuenta con registros de evaporación y es la que se encuentra más cerca de la zona de estudio.

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	MEDIA
MEDIA	5,70	5,51	5,04	4,55	3,89	3,57	3,83	5,07	6,10	6,06	6,40	6,22	5,08

**TABLA 4.2.- Medias mensuales de evaporación de la estación CENAVIT.**

	Datos Medidos [cm.]			Datos estación CENAVIT [cm.]		
Mes	Agosto	Septiembre	Octubre	Agosto	Septiembre	Octubre
Media	0,573	0,660	0,629	0,507	0,610	0,606

**TABLA 4.3.- Comparación entre los valores medidos y los proporcionados por el SENAMHI**



**GRÁFICA 4.12.- Comparación entre “Datos medidos vs. Datos proporcionados por el SENAMHI.**

Como puede apreciarse en el Gráfico 4.12 existe una relación entre los datos que se midió y los proporcionados por el SENAMHI de la estación CENAVIT, existe una correlación del 93,26%, por lo que podemos aseverar que los datos que se midieron son válidos para el presente trabajo.

Una vez que se verificaron y validaron los datos medidos, se realizó una comparación entre los datos medidos y los que se calcularon mediante las ecuaciones calibradas, obteniendo las siguientes tablas.

	Perdidas por Evaporación Medidas [cm.]			Perdidas por Evaporación Calculadas [cm.]		
	Evaporímetro	Geo-membrana	H°Cº	Evaporímetro	Geo-membrana	H°Cº
<b>Media</b>	0,573	0,660	0,629	0,572	0,655	0,626

<b>Media Agosto</b>	0,533	0,638	0,613	0,534	0,623	0,606
<b>Media Septiembre</b>	0,600	0,682	0,648	0,598	0,680	0,643
<b>Media Octubre</b>	0,573	0,646	0,612	0,569	0,646	0,619

**TABLA 4.4.- Valores medios totales y mensuales de pérdidas por evaporación medidos y calculados para el evaporímetro, el reservorio impermeabilizado con geo-membrana y el de hormigón ciclópeo.**

Como puede observarse en la Tabla 4.4 los valores medios medidos y cálculos son aproximadamente similares, al igual que todos los datos diarios, los cuales se encuentran en el **Anexo VII**, esto nos muestra que las ecuaciones que se dedujeron anteriormente para cada caso pueden ser utilizadas con confianza para el diseño de cualquier proyecto de este tipo; es decir que contando solamente con la temperatura del lugar podemos obtener la evaporación ya sea diaria o mensual, ya que las variaciones que existen son del orden de la centésima parte de un centímetro, también puede notarse que las menores pérdidas por evaporación se encuentran en el tanque

evaporímetro y las mayores en el reservorio impermeabilizado con geo-membrana, esto es debido a que en el último el área de espejo de agua es considerablemente grande.

#### 4.2.2 Comparación de las pérdidas por infiltración.

Como se mencionó anteriormente las pérdidas por infiltración sólo se analizarán para el reservorio sin impermeabilización y para el que esta impermeabilizado con arcilla compactada, esto debido a que en los otros dos se supone que no existen pérdidas por infiltración o estas son muy pequeñas.

Ambos reservorios que sufren pérdidas por infiltración además de las de evaporación, no pueden ser comparados uno con otro, esto debido a que presenta grandes diferencias, que se muestran en la Tabla 4.5, por lo que en este punto sólo se mostrara la incidencia de la altura de la carga con las pérdidas por infiltración y se identificaran y harán algunas recomendaciones para mejorar su construcción y así disminuir las mismas.

	<b>Reservorio Impermeabilizado con Arcilla Compactada</b>	<b>Reservorio sin Impermeabilización</b>
Clasificación AASTHO	A - 6	A - 4
Clasificación SUCS	ML - CL	SM
Índice de Plasticidad	15,26	2,00
Densidad Máxima [gr/cm <sup>3</sup> ]	1,75	1,86
Humedad Optima [%]	16,07	14,10
Densidad In Situ [gr/cm <sup>3</sup> ]	1,53	1,31
Grado de Compactación [%]	87,14%	70,45%

**TABLA 4.5.- Comparación entre los suelos de la base del reservorio sin impermeabilizar y el impermeabilizado con arcilla compactada.**

##### 4.2.2.1 Reservorio sin impermeabilizar.

Algunas de las fallas que se detectaron en el diseño y/o construcción de este reservorio fueron las siguientes:

- ✓ Primeramente, su ubicación no fue la correcta debido al tipo de suelo que se encontraba en el lugar, claramente se podían observar floraciones de rocas en las paredes del reservorio y en su base, luego de realizado el análisis de laboratorio se evidenció que se trataba de un suelo arenoso, el cual no es el correcto para evitar que el agua se infiltre debido a su elevado grado de permeabilidad.
- ✓ Adicionando a que se trataba de un suelo arenoso, las pérdidas pudieron minimizarse, poniendo más atención a la hora de compactar el suelo, lo cual no se hizo ya que el grado de compactación que se obtuvo fue de un 70,45%, el cual es relativamente bajo para este tipo de obras, este fue otro motivo para que el agua se infiltre aún más.
- ✓ Por último, el reservorio no cuenta con canales de captación por ninguna parte, lo que nos dice que este reservorio debe almacenar muy poca agua y está casi en su totalidad se pierde ya sea por evaporación y/o infiltración.

#### **4.2.2.2 Reservorio impermeabilizado con arcilla compactada.**

Al igual que en el anterior reservorio en este existieron algunas fallas o descuidos en el diseño y/o construcción, aunque estas fueron mucho menores ya que el agua que se perdió en este reservorio fue aproximadamente un 50% menos que las del reservorio sin impermeabilizar.

- ✓ Al igual que en el reservorio sin impermeabilizar la compactación aunque fue mejor en este caso, aún puede mejorarse más, debe tratarse de tener en cuenta la humedad óptima a la hora de compactar el reservorio, para así lograr alcanzar valores elevados del grado de compactación y menores pérdidas por infiltración.
- ✓ Las obras complementarias son importantes también, y al igual que en el reservorio se debe tener cuidado en su diseño y construcción, ya que este reservorio al igual que el anterior no cuenta con canales de captación y más importante aún, no cuenta con un sedimentador, por lo

que todo el sedimento que traen las pequeñas corrientes de agua se depositan en el reservorio, reduciendo su volumen y su vida útil.

#### 4.2.3 Comparación de los costos de construcción.

Para analizar y comprar los costos necesarios para la primera fase de inversión (construcción) de un reservorio ya sea impermeabilizado o no, el autor propuso diseñar cuatro reservorios de distintas capacidades e impermeabilizados con distintos materiales, estos cálculos se muestran a detalle en el [Anexo V](#) y un resumen se muestra a continuación en la Tabla 4.6.

También se realizó un análisis de los costos de una segunda fase de inversión (operación y mantenimiento) que se encuentran en el [Anexo VIII](#), y un resumen se muestra en la Tabla 4.7, estos costos de operación y mantenimiento de los reservorios son anuales, teniendo en cuenta que estos serán los mismos tanto para el reservorio sin impermeabilización y el impermeabilizado con arcilla compactada.

Capacidad [m3.]	Costo Construcción Reservorios [Bs.]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo
500	19 635,21	27 427,84	75 930,94	101 754,73
1000	32 808,29	49 058,51	131 350,60	179 515,38
2000	54 379,40	86 664,14	231 602,29	322 738,71
3000	74 592,66	121 510,46	326 139,15	459 180,86

**TABLA 4.6.- Costo de construcción de reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

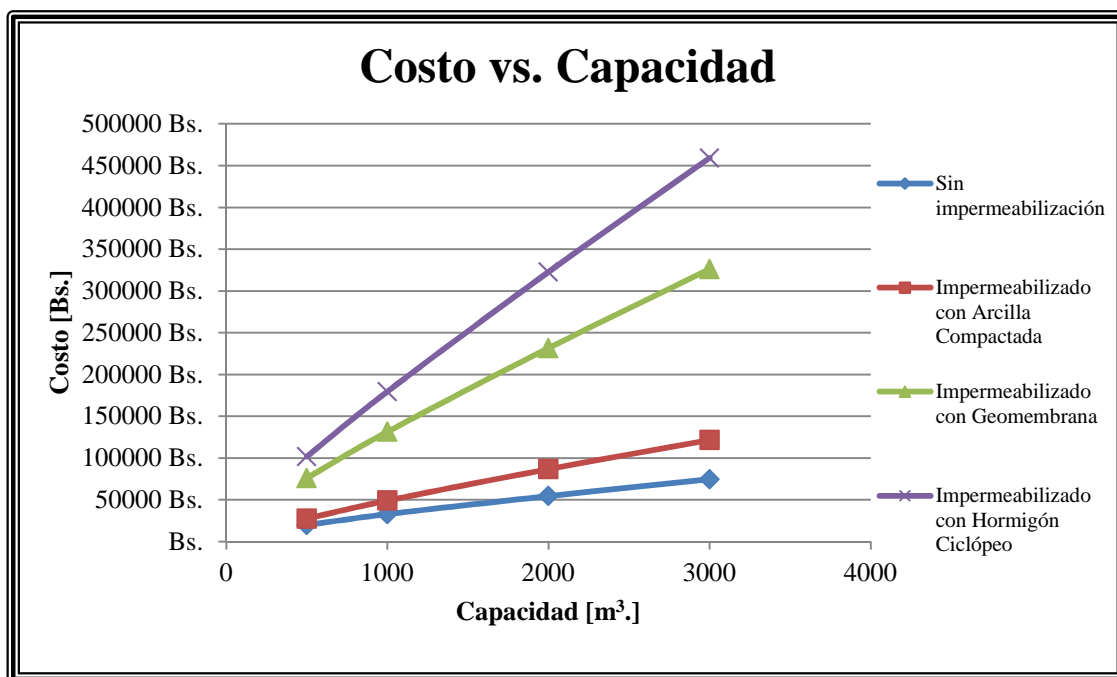
Capacidad [m3.]	Costo Operación y Mantenimiento Reservorios [Bs.]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo
500	22.540,45		24.391,95	24.547,95
1000	22.763,80		25.647,30	25.881,30

2000	22.942,50	27.890,00	29.020,00
3000	23.121,20	30.132,70	31.418,70

**TABLA 4.7.- Costo de operación y mantenimiento de reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

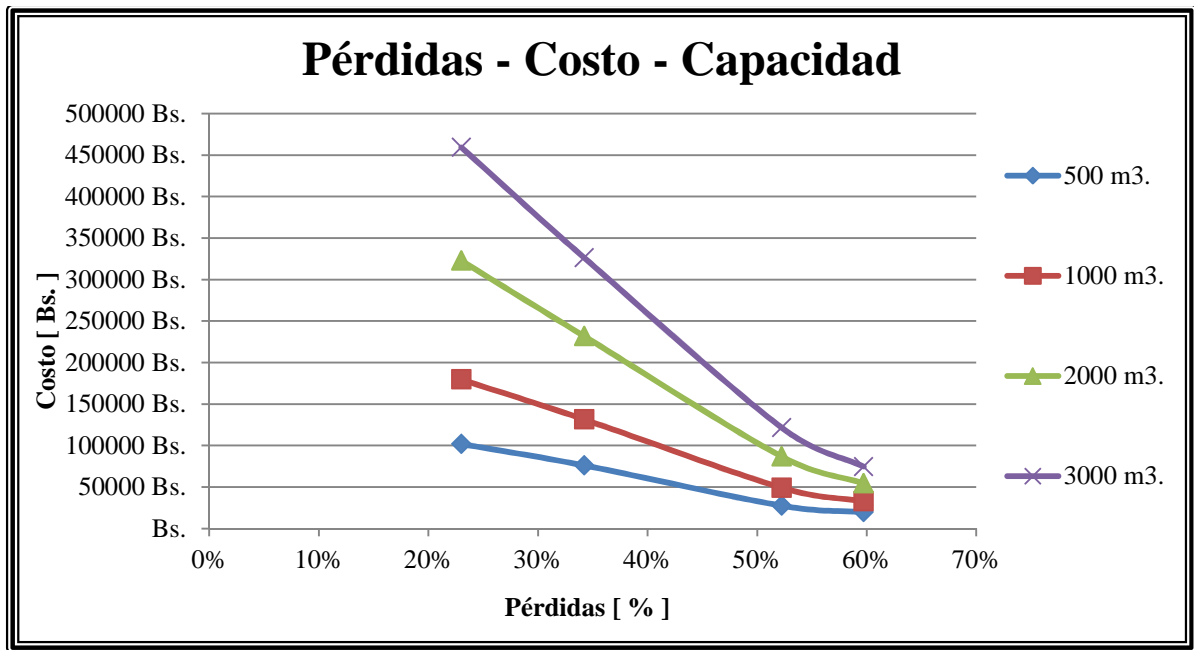
Capacidad [m3.]	Costo Construcción Reservorios [Bs.]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo
500	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1000	167,09%	178,86%	172,99%	176,42%
2000	276,95%	315,97%	305,02%	317,17%
3000	379,89%	443,02%	429,52%	451,26%

**TABLA 4.8.- Porcentajes de incremento en los costos de construcción de reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**



**GRÁFICA 4.13.- Comparación de “Costo vs. Capacidad” de reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

Como se puede observar en la Tabla 4.7 y en el Gráfico 4.13, reservorios mayores a 2000 m<sup>3</sup> tienen un costo mayor, por lo que no es recomendable su construcción, además de que estos reservorios sufrirán mayores pérdidas.



**GRÁFICA 4.14.- Comparación de “Pérdidas, Costo y Capacidad” en reservorios de agua de lluvia.**

El Gráfico 4.14 viene a ser un complemento del Gráfico 4.13, ya que en este a diferencia del anterior se puede apreciar que para un reservorio de determinada capacidad las pérdidas estarán en función del costo de construcción de este.

También se decidió obtener el costo por metro cúbico de agua almacenada, primeramente en la Tabla 4.8 en donde para la obtención de este parámetro no se tomó en cuenta las distintas pérdidas y luego en la Tabla 4.9 en donde sí se las tomo.

Capacidad [m <sup>3</sup> ]	Costo Metro Cubico de Agua Almacenada [Bs. / m <sup>3</sup> ]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-Membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo

500 m3.	39,27	54,86	151,86	203,51
1000 m3.	32,81	49,06	131,35	179,52
2000 m3.	27,19	43,33	115,80	161,37
3000 m3.	24,86	40,50	108,71	153,06

**TABLA 4.9.- Costo por metro cúbico de agua almacenada en reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

Capacidad [m3.]	Volumen Útil Almacenado [m3.]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-Membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo
500	251,40	288,80	435,00	380,00
1000	502,80	577,60	870,00	760,00
2000	1005,60	1155,20	1740,00	1520,00
3000	1508,40	1732,80	2610,00	2280,00

**TABLA 4.10.- Volumen útil de agua almacenada en reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

Capacidad [m3.]	Costo Metro Cubico de Agua Útil Almacenada [Bs. / m3.]			
	Sin impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con Geo-Membrana	Impermeabilizado con Hormigón Ciclópeo
500 m3.	78,10	94,97	174,55	267,78
1000 m3.	65,25	84,94	150,98	236,20
2000 m3.	54,08	75,02	133,10	212,33
3000 m3.	49,45	70,12	124,96	201,40

**TABLA 4.11.- Costo por metro cúbico de agua útil almacenada en reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización.**

Adicionalmente del análisis de las variables capacidad y costo de construcción de los reservorios, también es necesario tomar en cuenta la vida útil que tendrán los mismos, haciendo un análisis, en el reservorio sin impermeabilización y el impermeabilizado con arcilla compactada dependerá en gran magnitud de la cantidad de sedimentos que

ingresen en estos, siendo que el segundo tendrá una mayor vida útil ya que para la construcción del mismo se deben tomar en cuenta algunas obras de arte (canales de ingreso, sedimentador, vertedero de excedencias).

Para los reservorios impermeabilizados con hormigón ciclópeo y geo-membrana su vida útil dependerá del material empleado en su construcción, en el primero también será importante la relación agua – cemento usada y la calidad de los materiales, lo cual influirá de gran manera en su vida útil. Finalmente la vida útil de la geo-membrana dependerá del origen fabricante y de las especificaciones técnicas de cada uno de estos, las más económicas son las de origen peruano, con una vida útil de 15 años y las de más alto costo pero también de mayor duración son las de origen argentino, las mismas que pueden tener una vida útil hasta de 30 años dependiendo del espesor de la misma.

	Sin Impermeabilización	Impermeabilizado con Arcilla Compactada	Impermeabilizado con H <sup>2</sup> O	Impermeabilizado con Geo-membrana
Capacidad [m3.]	694,29	737,85	520,38	788,08
Pérdidas por Evaporación [cm.]	36,10	36,10	36,10	36,10
Pérdidas por Infiltración [cm.]	47,00	24,10	3,55	5,50
Pérdidas Totales [cm.]	83,10	60,20	39,65	41,60
Altura de Carga [cm.]	243,00	212,00	197,00	230,00
Vol. Pérdidas por Evaporación [m3.]	186,18	229,05	99,03	215,33
Vol. Pérdidas por Infiltración [m3.]	228,45	156,43	11,06	29,20
Volumen Total de Perdidas [m3.]	414,63	385,48	110,08	244,53
Pérdidas por Evaporación [%]	26,82%	31,04%	19,03%	27,32%
Pérdidas por Infiltración [%]	32,90%	21,20%	2,12%	3,71%
Pérdidas Totales [%]	59,72%	52,24%	21,15%	31,03%
Vida Útil [años]	5 - 7	8 - 10	15 - 20	15 - 30

**TABLA 4.12.- Porcentaje de pérdidas y vida útil de los reservorios.**

Finalmente en la Tabla 4.8, se puede observar la gran incidencia que tienen las pérdidas en los reservorios, primeramente en el reservorio sin impermeabilización 59,72% del agua se perderá por infiltración y evaporación, algo similar ocurre en el

reservorio impermeabilizado con arcilla compactada en donde también más del 50% del agua se perderá, estos valores reducen considerablemente en los reservorios impermeabilizados con hormigón ciclópeo y el de geo-membrana, hasta unos valores de 23% y 34,23% respectivamente, en donde las pérdidas por infiltración representan un porcentaje mínimo comparado con los dos reservorios anteriores.

Es importante mencionar que las pérdidas que se dedujeron anteriormente son para el tiempo que duró el presente proyecto, es decir tres meses, pero la época de estiaje en nuestro medio tiene una mayor duración, por lo que para poder proyectar los valores obtenidos se procedió a calcular primeramente medias semanales y luego con estas se calculó las medias mensuales de las pérdidas por evaporación que sufren los distintos reservorios.

	<b>Sin Impermeabilización</b>	<b>Impermeabilizado con Arcilla Compactada</b>	<b>Impermeabilizado con H<sup>o</sup>C<sup>o</sup></b>	<b>Impermeabilizado con Geo-membrana</b>
Pérdidas Totales en la duración del Proyecto [%]	59,72%	52,24%	21,15%	31,03%
Media Mensual de Pérdidas [%]	16,92%	14,80%	5,99%	8,79%

**TABLA 4.13.- Porcentaje de pérdidas mensuales.**

## CONCLUSIONES.

Las conclusiones a las que se llegó al término de este trabajo son las siguientes:

- Se determinaron las pérdidas por infiltración y evaporación en los distintos reservorios, obteniendo los porcentajes de incidencia de estos en la capacidad de los mismos, llegando a obtener valores de pérdidas hasta el 59,72% como más alto en el reservorio sin impermeabilizar, hasta un valor de 23,00%, como más bajo para el reservorio impermeabilizado con hormigón ciclópeo, cabe resaltar que estos valores fueron obtenidos para el tiempo de estudio que fue de tres meses.
- Analizando los resultados de las pérdidas por evaporación en el tanque evaporímetro para la zona alta de la cuenca del Río Santa Ana, se observó el comportamiento de éste en función de las temperaturas máximas que se presentan en esta zona, obteniéndose dos calibraciones, la primera que sólo es válida para temperaturas máximas entre los 0 y 20 °C fue una calibración exponencial “ $Pe=0,1307 * e^{0,0676 * Tem. Max.}$ ” que se ajusta con una correlación del 98,93% y tiene un comportamiento creciente; la segunda que sólo es válida para temperaturas máximas mayores a los 20 °C. fue una calibración lineal “ $Pe=0,0169 * Tem. Max.+0,141$ ” que se ajusta con una correlación del 95,68% y también presenta un comportamiento creciente; esto comprueba la teoría de que, a medida que aumenta la temperatura máxima que se presenta en la zona, la evaporación también va aumentando.
- Se determinó que los volúmenes por pérdidas de evaporación son mayores cuando el área del espejo de agua también lo es, por lo que se concluyó que los reservorios no deben tener grandes áreas de espejos de agua.
- Si los reservorios serán sin impermeabilizar o impermeabilizados con arcilla compactada, se debe prestar mayor atención al análisis de suelos, esto en el diseño y en la construcción prestar mayor atención a la compactación del mismo, ya que si se desea reducir costos y también las pérdidas, éstas pueden disminuir considerablemente tomando en cuenta estos dos puntos.

- Si los reservorios serán impermeabilizados con hormigón ciclópeo o geo-membrana, en su diseño, en lo posible, debe tratarse de que éstos tengan mayores alturas de carga, para así reducir al máximo el área del espejo de agua, ya que tomando esto en cuenta las pérdidas por evaporación pueden reducirse significativamente.
- Realizando una comparación entre el costo de construcción y las pérdidas que sufrirán los reservorios, se concluye que el mejor material para impermeabilizar estos es la geo-membrana, debido a que presenta un menor costo que el hormigón ciclópeo y una mayor vida útil; y realizando pequeños ajustes en su diseño las pérdidas por evaporación pueden ser disminuidas, es decir aumentar la altura de carga para así disminuir el área del espejo de agua.
- Este estudio demuestra que no es aconsejable la determinación de pérdidas en reservorios aplicando de manera “automática” o “mecánica” la hoja electrónica de EXCELL proporcionada por el PRONAR para cualquier zona, ya que en ésta los valores de evaporación e infiltración son asumidos, en este caso se demostró que las pérdidas reales son mucho mayores, cometiendo errores de sub-dimensionamiento de los reservorios, y esto se puede verificar en varios reservorios de la zona de estudio, en donde se puede apreciar que los mismo no cuentan con agua almacenada en las épocas mas criticas, ya que la misma se pierde mucho antes de poder ser utilizada ya sea con fines de riego de un pequeño huertillo o para el consumo del ganado.

## **RECOMENDACIONES.**

Las recomendaciones que se plantean al término de este trabajo son las siguientes:

- Se recomienda que en el proceso de diseño de reservorios impermeabilizados, las áreas de espejos de agua no deben ser mayores a los 500 m<sup>2</sup>, ya que valores mayores a este representan mayores pérdidas por evaporación.
- Comparando los costos necesarios para la construcción de reservorios de distintas capacidades y materiales de impermeabilización, se recomienda evitar diseñar y/o construir reservorios con capacidades mayores a los 2000 m<sup>3</sup>., en especial si estos serán impermeabilizados con hormigón ciclópeo o geo-membrana, ya que su costo se va incrementando en más del 100 % a mayores capacidades de almacenamiento que la mencionada.
- Se recomienda para futuras investigaciones: ampliar el tiempo de estudio, para así poder tener más datos que comparar y validar, con datos de estaciones cercanas a la zona de estudio. Así mismo realizar el análisis de la permeabilidad de los suelos de la base de los reservorios, determinar sus coeficientes de permeabilidad y su relación con el tipo de suelo y el grado de compactación del mismo.
- Se debe ampliar la selección de sitios de estudio en la que se analicen las pérdidas por evaporación, para obtener una mejor gama de ecuaciones en función de la temperatura máxima para distintas zonas del Valle Central de Tarija.
- Se recomienda realizar investigaciones adicionales en el resto del departamento y el país, para determinar si se confirma la tendencia de este estudio.