# UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

## FACULTAD DE INGENIERIA

## ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

## Tesis

**Influencia de la infiltración en la capacidad de recarga hídrica utilizando la metodología CUBHIC en bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay – 2023**


Asesora:

Mag. Salas Peña, Vanesa

Autores**:**

Nuñez Corrales, José Antonio

Pinares Palomino, Erslim


Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental


Abancay - Apurímac – Perú

2024

## ACTA DE TITULO N°. 0002-2024-UTEA-FI-EPIARN

Reunidos los Jurados constituidos por los señores Docentes:

| | | |
|---|---|---|
| * | **Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo** | **PRESIDENTA.** |
| * | **Mg. Javier Sierra Puga** | **DICTAMINANTE.** |
| * | **Ing. Jessica Alvarado Ramos** | **REPLICANTE** |

El postulante al **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

Don (ña): **NUÑEZ CORRALES, Jose Antonio;** ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grado Académico y Título de la Universidad Tecnológica de los Andes.

MODALIDAD DE (*) **SUSTENTACIÓN DE TESIS.**

INTITULADA: **Influencia de la infiltración en la capacidad de recarga hídrica utilizando la metodología CUBHIC en bofedades de la microcuenca Rontoccocha Abancay-2023**

Habiendo aprobado con la nota de: **DOCE (12).**

Se extiende el Acta, conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, folio(s) N° 127 y 128.

Abancay, 07 de Agosto del 2024.

Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo
**PRESIDENTA**

Mg. Javier Sierra Puga
**DICTAMINANTE**

Mg.. Jessica Alvarado Ramos
**REPLICANTE**

## ACTA DE TITULO N°. 0002-2024-UTEA-FI-EPIARN

Reunidos los Jurados constituidos por los señores Docentes:

| | | |
|---|---|---|
| * | **Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo** | **PRESIDENTA.** |
| * | **Mg. Javier Sierra Puga** | **DICTAMINANTE.** |
| * | **Ing. Jessica Alvarado Ramos** | **REPLICANTE** |

El postulante al **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

Don (ña): **PINARES PALOMINO, Erslim;** ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grado Académico y Título de la Universidad Tecnológica de los Andes.

MODALIDAD DE (*) **SUSTENTACIÓN DE TESIS.**

INTITULADA: **Influencia de la infiltración en la capacidad de recarga hídrica utilizando la metodología CUBHIC en bofedades de la microcuenca Rontoccocha Abancay-2023**

Habiendo aprobado con la nota de: **DOCE (12).**

Se extiende el Acta, conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, folio(s) N° 127 y 128.

Abancay, 07 de Agosto del 2024.

.....
Mg. Kristhel Jaylane Calderón Aedo
**PRESIDENTA**

.....
Mg. Javier Sierra Puga
**DICTAMINANTE**

.....
Mg. Jessica Alvarado Ramos
**REPLICANTE**

InfluInfluencia de la infiltración en la capacidad de recarga hídrica utilizando la metodología CUBHIC en bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay – 2023encia de la infiltración en la capacida

INFORME DE ORIGINALIDAD

| 22% | 22% | 3% | 6% |
|---|---|---|---|
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|---|---|
| 1 | repositorio.lamolina.edu.pe<br>Fuente de Internet | 4% |
| 2 | repositorio.utea.edu.pe<br>Fuente de Internet | 3% |
| 3 | hdl.handle.net<br>Fuente de Internet | 1% |
| 4 | es.scribd.com<br>Fuente de Internet | 1% |
| 5 | repositorio.ucss.edu.pe<br>Fuente de Internet | 1% |
| 6 | Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga<br>Trabajo del estudiante | 1% |
| 7 | dspace.espoch.edu.ec<br>Fuente de Internet | 1% |

**Metadatos Complementarios**

| | | |
|---|---|---|
| **Datos del Autor** | | |
| Apellidos y nombres | : | Nuñez Corrales, José Antonio<br>Pinares Palomino, Erslim |
| Tipo de documento de identidad | | DNI |
| Número de documento de identidad | | 42379351<br>46142864 |
| URL ORCID | | |
| **Datos del Asesor** | | |
| Apellidos y nombres | | Mag. Salas Peña, Vanesa |
| Tipo de documento de identidad | : | DNI |
| Número de documento de identidad | : | 70144718 |
| URL ORCID | : | https://orcid.org/0000-0003-3734-6278 |
| **Datos de la Investigación** | | |
| Facultad | : | Ingeniería |
| Escuela profesional | : | Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales |
| Línea de investigación | : | Calidad Ambiental |
| Rango de años en que se realizó la investigación | | 1 año |
| Fuente de financiamiento | : | Autofinanciado |
| Porcentaje de originalidad | : | 22% |
| URL de OCDE | : | https://purl.org/pe-repo/ocde/ford# 2.07.01 |

## Dedicatoria

El resultado de este estudio lo dedico a mi hijo, Josse Adriano, ya que su amor y ternura son las principales fuentes de mi felicidad, de mi dedicación y de mi determinación para buscar lo óptimo, tanto para él como para mí, y para nuestro bienestar conjunto. A pesar de tu corta edad, has sido y sigues siendo mi maestro, enseñándome muchas lecciones valiosas sobre la vida.

**José Antonio Núñez Corrales**

Esta investigación está dedicada a la mujer que siempre fue mi ejemplo e inspiración, por tu resiliencia a la vida y por esa personalidad fuerte e independiente, siempre decidida a conseguir sus objetivos. Querida y amada madre, Rosalina Palomino Ch., todos aquellos logros obtenidos a lo largo de mi vida estarán dedicados a ti. Asimismo, quiero dedicar este pequeño escalón en mi vida profesional a mi pedacito de corazón, a mi amor eterno, mi hija Aslim Cataleya.

**Erslim Pinares Palomino**

**Agradecimiento**

A mi familia, compuesta por mis padres, mi hijo, mis hermanos, mis hermanas y sobrinos, les debo un profundo agradecimiento por confiar en mí y por ser ejemplos de superación, humildad y sacrificio. Ellos me han enseñado a valorar todo lo que tengo y me han inspirado a perseguir el éxito en la vida. Su apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar este logro, y sé que puedo contar con ellos en cada paso que dé en mi camino.

Además, quiero expresar mi gratitud al Dr. Carlos Moreano Huayhua, por su disposición, acompañamiento y enseñanzas que me han ayudado a concluir este estudio.

**José Antonio Nuñez Corrales.**

Ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, estando a mi lado en los días y noches más difíciles durante mi proceso de estudio. Quiero expresar mi profundo agradecimiento a cada uno de ustedes: a ti, mi colorada hermosa, por ser mi ejemplo de vida; a ti, padre, por tu apoyo incondicional que me ha permitido cumplir mi más grande anhelo de convertirme en ingeniero; a ti, mi querido hermano, Carlos Ivan, quien con tus actitudes y aptitudes has sido el campeón y orgullo de la familia; a ti, flaco querido, a quien deseo que sigas el camino de tus hermanos mayores. Por último, quiero agradecer infinitamente a mi querida y amada Fiorella, quien me dio el regalo más hermoso de mi vida: nuestra hermosa hija.

**Erslim Pinares Palomino**

**Resumen**

El estudio “Influencia de la infiltración en la capacidad de recarga hídrica utilizando la metodología CUBHIC en bofedales de la microcuenca Rontoccocha" tiene como objetivo determinar cómo la infiltración afecta la capacidad de recarga hídrica en los bofedales de este sector.

El método utilizado en esta investigación es de tipo deductivo-inductivo, observacional, aplicativo, no experimental y correlacional-causal. Se seleccionó una muestra de 30 puntos de infiltración en los bofedales del sector. Los resultados obtenidos indican que la infiltración en los bofedales estudiados varía entre 0,2 y 7,9 cm de altura infiltrada en los puntos seleccionados, con una velocidad que oscila entre 0,72 y 210,00 mm/hr. El volumen acumulado de agua se encuentra en un rango de 2,50 a 52,60 cm, alcanzando su punto de saturación en un promedio de 120 minutos.

En cuanto a la capacidad de recarga hídrica, se determinó que la escorrentía generada es de 623,16 mm/ha/año, lo que equivale a 311 583 $m^3$/año en un área de 50 ha de ecosistema de bofedal. La percolación se estimó en 554,28 mm/año, generando 277 143 $m^3$/año en la misma área de bofedal.

**Palabras Clave:** Infiltración, recarga hídrica, bofedal.

**Abstract**

The study Influence of infiltration on water recharge capacity using the CUBHIC methodology in bofedales of the Rontoccoca micro-watershed aims to determine how infiltration affects the water recharge capacity in the bofedales of this micro-watershed.

The method used in this research is deductive-inductive, observational, applicative, non-experimental, and correlational-causal. A sample of 30 infiltration points in the bofedales of the micro-watershed was selected. The results obtained indicate that infiltration in the studied bofedales varies between 0.2 and 7.9 cm of infiltrated depth at selected points, with a speed ranging from 0.72 to 210.00 mm/hr. The accumulated water volume ranges from 2.50 to 52.60 cm, reaching saturation point on average within 120 minutes.

Regarding the water recharge capacity, it was determined thet the runoff generated is 623.16 mm/ha/year, equivalent to 311,583 $m^3$/year in an area of 50 ha of bofedal ecosystem. Percolation was estimated at 554.28 mm/year, generating 277.143 $m^3$/year in the same bofedal area.

***Keywords***: infiltration, water recharge, bofedal.

## Índice general

Pág.

Portada ..... i

Acta de sustentación ..... ii

Reporte de similitud ..... iv

Metadatos complementario ..... v

Dedicatoria ..... vi

Agradecimiento ..... vii

Resumen ..... viii

Abstract ..... ix

Índice general ..... x

Índice de tablas ..... xiii

Índice de figuras ..... xv

I. Introducción ..... 17

II. Planteamiento del problema ..... 19

2.1. Descripción y formulación del problema ..... 19

2.1.1. Problema general ..... 22

2.1.2. Problemas específicos ..... 22

2.2. Objetivos de la investigación ..... 23

2.2.1. Objetivo general ..... 23

2.2.2. Objetivos específicos ..... 23

2.3. Justificación e importancia ..... 23

2.4. Hipótesis ..... 25

2.4.1. Hipótesis general ..... 25
2.4.2. Hipótesis especificas ..... 25
2.5. Variables ..... 26
III. Marco teórico ..... 28
3.1. Antecedentes ..... 28
3.1.1. A nivel internacional ..... 28
3.1.2. A nivel nacional ..... 31
3.1.3. A nivel regional y local ..... 33
3.2. Bases teóricas ..... 35
3.3. Definición de términos ..... 53
IV. Metodología ..... 56
4.1. Tipo y nivel de investigación ..... 56
4.2. Ámbito temporal y espacial ..... 57
4.3. Población y muestra ..... 58
4.3.1. Población ..... 58
4.3.2. Muestra ..... 58
4.3.3. Muestreo ..... 58
4.4. Instrumentos ..... 59
4.4.1. Técnicas ..... 59
4.4.2. Instrumentos ..... 70
4.5. Procedimientos ..... 70
4.6. Consideraciones éticas ..... 71
V. Resultados y discusión ..... 72

5.1. Resultados.....72

5.2. Discusión de resultados.....143

VI. Conclusiones.....145

VII. Recomendaciones.....146

VIII. Referencias.....147

IX. ANEXOS.....**¡Error! Marcador no definido.**

## Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variable .....26
Tabla 2 propiedades físicas del suelo .....39
Tabla 3 Rangos de velocidad.....47
Tabla 4 Ubicación de áreas de muestreo.....72
Tabla 5 Datos de la muestra M01 .....74
Tabla 6 Datos de la muestra M02 .....76
Tabla 7 Datos de la muestra M03 .....78
Tabla 8 Datos de la muestra M04 .....80
Tabla 9 Datos de la muestra M05 .....82
Tabla 10 Datos de la muestra M06 .....84
Tabla 11 Datos de la muestra M07 .....86
Tabla 12 Datos de la Muestra M08 .....88
Tabla 13 Datos de la muestra M09 .....90
Tabla 14 Datos de la muestra M10 .....92
Tabla 15 Datos de la muestra M11 .....94
Tabla 16 Datos de la muestra M12 .....96
Tabla 17 Datos de la muestra M13 .....98
Tabla 18 Datos de la muestra M14 .....100
Tabla 19 Datos de la muestra M15 .....102
Tabla 20 Datos de la muestra M16 .....104
Tabla 21 Datos de la muestra M17 .....106
Tabla 22 Datos de la muestra M18 .....108
Tabla 23 Datos de la muestra M19 .....110
Tabla 24 Datos de la muestra M20 .....112
Tabla 25 Datos de la muestra M21 .....114
Tabla 26 Datos de la muestra M22 .....116

Tabla 27 Datos de la muestra M23 ....118
Tabla 28 Datos de la muestra M24 ....120
Tabla 29 Datos de la muestra M25 ....122
Tabla 30 Datos de la muestra M26 ....124
Tabla 31 Datos de la muestra M27 ....126
Tabla 32 Datos de la muestra M28 ....128
Tabla 33 Datos de la muestra M29 ....130
Tabla 34 Datos de la muestra M30 ....132
Tabla 35 Lámina de agua y volumen en bofedales ....135
Tabla 36 Coeficiente de correlación de Pearson ....137
Tabla 37 Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación ....138
Tabla 38 Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación ....138
Tabla 39 Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación. ....139
Tabla 40 Análisis de varianza de la tasa de infiltración (cm/hr) ....141
Tabla 41 Análisis de varianza de la conductividad hidráulica ....142

## Índice de figuras

Figura 1 Curva de Infiltración .....37
Figura 2 Efecto de la diferencia de niveles de agua .....41
Figura 3 Flujo de agua .....41
Figura 4 Evolución de la tasa de infiltración .....41
Figura 5 Variación de la curva de velocidad .....45
Figura 6 Esquema de la clasificación de bofedales .....50
Figura 7 Sector Rontococcha .....58
Figura 8 Resultados de la muestra M01 .....76
Figura 9 Resultado de la muestra M02 .....78
Figura 10 Resultados de la muestra M03 .....80
Figura 11 Resultados de la muestra M04 .....82
Figura 12 Resultados de la muestra M05 .....84
Figura 13 Resultados de la muestra M06 .....86
Figura 14 Resultados de la muestra M07 .....88
Figura 15 Resultados de la muestra M08 .....90
Figura 16 Resultados de la muestra M09 .....92
Figura 17 Resultados de la muestra M10 .....94
Figura 18 Resultados de la muestra M11 .....96
Figura 19 Resultados de la muestra 12 .....98
Figura 20 Resultados de la muestra M13 .....100
Figura 21 Resultados de la muestra M14 .....102
Figura 22 Resultados de la muestra M15 .....104
Figura 23 Resultados de la muestra M16 .....106
Figura 24 Resultados de la muestra M17 .....108
Figura 25 Resultados de la muestra M18 .....110
Figura 26 Resultados de la muestra M19 .....112

Figura 27 Resultados de la muestra M20.....114
Figura 28 Resultados de la muestra M21.....116
Figura 29 Resultados de la muestra M22.....118
Figura 30 Resultados de la muestra M23.....120
Figura 31 Resultados de la muestra M24.....122
Figura 32 Resultados de la muestra M25.....124
Figura 33 Resultados de la muestra M26.....126
Figura 34 Resultados de la muestra M27.....128
Figura 35 Resultados de la muestra M28.....130
Figura 36 Resultados de la muestra M29.....132
Figura 37 Resultados de la muestra M30.....134
Figura 38 Datos de precipitación.....135
Figura 39 Volúmenes de escorrentía y percolación .....136
Figura 40 Relación de la escorrentía y percolación.....136
Figura 41 Tasa de infiltración (cm/hr).....140
Figura 42 Conductividad hidráulica (cm/hr).....141

# I. Introducción

Los bofedales son ecosistemas frágiles y vitales que proveen servicios ecosistémicos fundamentales, entre los cuales se destaca su rol en la regulación hídrica. En el contexto de la microcuenca Rontoccocha, la infiltración juega un papel crucial en la capacidad de recarga hídrica de los bofedales, la presente tesis se desarrolla bajo la premisa de cuatro capítulos.

El Capítulo I establece el plan de investigación, delineando los objetivos, la relevancia y la estructura general del estudio. Se detallan las preguntas de investigación que orientarán el desarrollo de la tesis, así como la importancia de abordar esta temática en el contexto local y global.

En el Capítulo II, se presenta el marco teórico que sustenta esta investigación. Se exploran conceptos clave relacionados con los bofedales, la infiltración del agua en el suelo y su influencia en la recarga hídrica, se revisan además estudios previos relevantes que ha abordado temas similares, proporcionando un contexto necesario para la compresión de los resultados obtenidos.

En el Capítulo III, se describe en detalle la metodología de investigación utilizada en el estudio. Se explican los procedimientos de muestreo, análisis de datos y aplicación de la metodología CUBHIC, para evaluar la infiltración y la capacidad de recarga hídrica en los bofedales de la microcuenca Ronctoccocha.

El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo anterior. Se analizan los datos recolectados y se discuten las implicaciones de estos hallazgos en relación con la infiltración y la recarga hídrica en los bofedales.

En conjunto, esta investigación busca contribuir al entendimiento de la relación entre la infiltración y la capacidad de recarga hídrica en los bofedales de la microcuenca Rontoccocha, proporcionando información valiosa para la conservación y gestión

adecuada de estos ecosistemas críticos en el contexto de cambio climático y presiones antropogénicas.

# II. Planteamiento del problema

## 2.1. Descripción y formulación del problema

Los bofedales, como tipo de humedal presente en las zonas andinas, se encuentran típicamente en áreas cercanas a cuerpos de agua como lagos, glaciares, manantiales, ríos y riachuelos. Estas regiones se caracterizan por presentar pastos resistentes y robustos, así como praderas pantanosas y frías. El drenaje en estas áreas es deficiente, lo que resulta en la retención de agua durante todo el año debido a la presencia de suelos mineralizados y arcillosos.

Estas condiciones proporcionan un hábitat propicio para el crecimiento de pastos, que son típicos de las altas elevaciones de la puna. Por lo tanto, los bofedales son de gran importancia para el pastoreo de altura, contribuyendo significativamente a la sustentabilidad de la actividad ganadera en estas regiones montañosas (Custred, 1977).

Los humedales, incluidos los bofedales, continúan experimentando una disminución tanto en su extensión como en su calidad. Se estima que la extensión global de los humedales y bofedales disminuyó entre un 64% y un 71% durante el siglo XX. Esta pérdida y degradación de los humedales y bofedales persisten en todo el mundo, lo que conlleva a una reducción en los servicios ecosistémicos que estos proporcionan a la sociedad. ( Medina y otros, 2023).

Existe una serie de iniciativas en curso que están contribuyendo a proporcionar un panorama más preciso de la extensión de los humedales y bofedales en todo el mundo. Sin embargo, es evidente que persiste una tendencia negativa, ya que estos ecosistemas continúan perdiéndose o degradándose. Esta pérdida y degradación tienen impactos significativos y negativos sobre la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos vitales. Una de las dificultades principales es que los responsables de formular políticas no siempre cuentan con información científica suficiente para comprender la urgencia de tomar medidas adecuadas para proteger y restaurar estos ecosistemas. Por lo tanto, es fundamental seguir fortaleciendo los esfuerzos de monitoreo y recolección de datos, así como aumentar la

sensibilización sobre la importancia crítica de los humedales y bofedales para el bienestar humano y la salud del medio ambiente. Esto ayudará a respaldar la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas efectivas de conservación y manejo sostenible de estos valiosos recursos naturales ( Medina y otros, 2023).

La superficie de humedales del Perú se estima en 549 360 hectáreas, lo que representa aproximadamente el 0,4% de la superficie terrestre del país. Estos humedales constituyen la mayor parte del hábitat andino del Perú. Sin embargo, la actividad humana ha tenido un impacto significativo sobre ellos, convirtiéndolos, en algunos casos, en paisajes culturales, es decir, son ecosistemas mantenidos por la actividad humana continua, en los que la fauna y la flora están compuestas por especies resilientes y adaptativas. Como resultado, las especies sensibles y especializadas ahora están restringidas a las partes restantes del paisaje natural intacto. En este contexto, los humedales se han convertido en importantes centros de biodiversidad y recursos importantes para las comunidades locales. Varios autores han llamado la atención sobre el problema del sobrepastoreo en los humedales, que supone una amenaza para la conservación y la biodiversidad en la que viven (Maldonado, 2014).

Todos los humedales en el territorio peruano podrían haber sido pastoreados en el pasado o estar sujetos a esta actividad en la actualidad, lo que conlleva una presión constante. La extracción de turba, conocida localmente como "champa", se realiza para obtener combustible utilizado en la cocina, mientras que la minería representa otro riesgo significativo. Esta actividad puede ocasionar la destrucción directa de extensas áreas de humedales y bofedales, así como impactarlos indirectamente mediante la introducción de contaminantes o la alteración de los patrones hídricos. Además, la construcción de represas en los Andes, destinadas a crear reservorios de agua a gran altura, también puede tener consecuencias significativas. Estas represas pueden inundar por completo extensas áreas de humedales y bofedales. En el contexto actual de cambio climático, estas acciones

contribuyen a la pérdida o reducción de la extensión de los humedales a gran escala (Salvador y otros, 2014).

No se dispone de información específica sobre la extensión de los bofedales protegidos en Perú, posiblemente debido a la ausencia de áreas naturales protegidas creadas exclusivamente para conservar estos ecosistemas. Sin embargo, algunas áreas protegidas incluyen los bofedales asociados a lagos y estanques. Por ejemplo, en las reservas nacionales de Junín (Junín y Pasco), Titicaca (Puno) y Salinas y Aguada Blanca (Arequipa), se consideran los bofedales dentro de sus límites. En otros casos, las comunidades vegetales de los bofedales están protegidas junto con las praderas andinas. Esto ocurre en lugares como la reserva paisajística Nor Yauyos Conchas (Junín, Lima), el parque nacional Huascarán (Ancash) y la reserva nacional Pampa Galeras (Ayacucho). Aunque estas áreas protegidas no se dedican específicamente a la conservación de los bofedales, reconocen su importancia dentro de sus ecosistemas más amplios (Maldonado, 2014).

La microcuenca Rontoccocha, como muchas otras áreas de bofedales en Perú, enfrenta un conjunto complejo de desafíos que amenazan la sostenibilidad de sus recursos hídricos y la biodiversidad asociada. La combinación de actividades agropecuarias intensivas, cambio climático y desarrollo infraestructural ha llevado a una reducción en la extensión y calidad de estos humedales críticos. La degradación de los bofedales no solo afecta la biodiversidad local, sino que también compromete los servicios ecosistémicos que proporcionan, como la regulación del ciclo hídrico, la recarga de acuíferos y el suministro de agua para uso agrícola y doméstico.

Los impactos específicos incluyen la pérdida de vegetación nativa, la compactación y saturación del suelo, la erosión acelerada y la disminución de la capacidad de los bofedales para almacenar y filtrar agua. Estas alteraciones no solo reducen la capacidad de los bofedales para soportar la biodiversidad, sino que también afectan directamente la vida y los

medios de subsistencia de las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas para el pastoreo y la agricultura.

Además, el cambio climático exacerba estos problemas al alterar los patrones de precipitación y aumentar la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos. Esto puede resultar en sequías más prolongadas o inundaciones más frecuentes, ambos de los cuales pueden tener efectos devastadores en los bofedales y en las comunidades que dependen de ellos.

Para abordar estos desafíos, es crucial implementar un enfoque de manejo integrado que combine la conservación de la biodiversidad con prácticas agrícolas sostenibles y la participación activa de las comunidades locales. Esto incluye la reforestación con especies nativas, la restauración de áreas degradadas, la implementación de prácticas de pastoreo sostenible y la construcción de infraestructura verde que ayude a retener y filtrar el agua. También es esencial mejorar el monitoreo y la recolección de datos para apoyar la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas efectivas de conservación.

En conclusión, la protección y restauración de los bofedales de la microcuenca Rontoccocha no solo es vital para la conservación de la biodiversidad y la regulación hídrica, sino que también es fundamental para la sostenibilidad a largo plazo de las comunidades locales y sus medios de vida.

### 2.1.1. Problema general

¿De qué manera influye la infiltración en la capacidad de recarga hídrica en bofedales de la microcuenca rontoccocha Abancay, 2023?

### 2.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la situación de la infiltración en bofedales de la microcuenca rontoccocha Abancay, 2023?
- ¿Cuál es la situación de la capacidad de recarga hídrica en bofedales de la microcuenca rontoccocha Abancay, 2023?

## 2.2. Objetivos de la investigación

### 2.2.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la infiltración en la capacidad de recarga hídrica utilizando la metodología CUBHIC en bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay 2023.

### 2.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la infiltración en bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay, 2023.
- Estimar la capacidad de recarga hídrica en bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay, 2023.

## 2.3. Justificación e importancia

El estudio propuesto surge de la necesidad imperante de comprender y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos en los bofedales, ecosistemas únicos y vulnerables que desempeñan un papel significativo en la regulación hidrológica y la provisión de agua en numerosas regiones montañosas de nuestro país. A continuación, se detallan las principales razones que respaldan y/o justifican la realización de este estudio:

Importancia de los bofedales: son ecosistemas de páramo altamente especializados, caracterizados por su capacidad única para retener y liberar agua. Son fuentes vitales de agua dulce en muchas regiones andinas, siendo esenciales para el suministro de agua potable, la agricultura, la biodiversidad y otros usos humanos y ecosistémicos.

Vulnerabilidad ante el cambio climático: los bofedales están siendo afectados por las consecuencias del cambio climático, que se manifiestan en cambios en los patrones de precipitación, temperatura y régimen hidrológico. Estas alteraciones pueden tener consecuencias significativas en la infiltración y la recarga hídrica, lo que a su vez afecta la disponibilidad de agua en las microcuencas donde se encuentran.

Relevancia para la planificación: los resultados de esta investigación proporcionarán información valiosa para los gestores de recursos naturales, los responsables de la planificación del agua y otras partes interesadas, permitiéndoles tomar decisiones

informadas sobre el manejo y conservación de los bofedales y los recursos hídricos asociados.

Teóricamente, los bofedales son ecosistemas únicos que ofrecen una oportunidad excepcional para estudiar las interacciones entre los procesos hidrológicos y ecológicos en ambientes de alta montaña. La literatura científica ha demostrado que estos ecosistemas juegan un papel crucial en la regulación del ciclo hidrológico, la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Sin embargo, existe una brecha significativa en la comprensión detallada de cómo los cambios ambientales y las actividades humanas afectan estos procesos. Esta investigación contribuirá a llenar esta brecha, proporcionando nuevos conocimientos sobre la dinámica de la infiltración y la recarga hídrica en los bofedales, lo que enriquecerá la base teórica y conceptual de la ecología y la hidrología de montaña.

Desde el punto de vista metodológico, esta investigación se distingue por la aplicación de la metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas), que representa un enfoque innovador y riguroso para evaluar los beneficios hidrológicos de los bofedales. La metodología CUBHIC combina técnicas de monitoreo *in situ* con modelos hidrológicos avanzados para cuantificar de manera precisa y detallada los flujos de agua y los procesos de recarga hídrica. Esta metodología no solo permitirá obtener datos de alta calidad y relevancia científica, sino que también establecerá un estándar metodológico que puede ser replicado en otras regiones con características similares, ampliando así el alcance y la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Desde un punto de vista práctico, los resultados de esta investigación tienen implicaciones directas y significativas para la gestión de los recursos hídricos y la conservación de los ecosistemas en la microcuenca Rontoccocha y otras áreas similares. Al proporcionar una comprensión detallada de los procesos de infiltración y recarga hídrica, esta investigación ayudará a desarrollar estrategias de manejo sostenible que aseguren la disponibilidad continua de agua para las comunidades locales y la biodiversidad. Los

hallazgos también informarán políticas y prácticas de conservación que pueden mitigar los efectos adversos del cambio climático y las actividades humanas. Además, la capacitación de los actores locales en técnicas de monitoreo y gestión de bofedales fortalecerá las capacidades locales y promoverá la participación comunitaria en la conservación de estos importantes ecosistemas.

En resumen, esta investigación no solo contribuirá al avance teórico y metodológico en el estudio de los bofedales, sino que también proporcionará soluciones prácticas y sostenibles para la gestión de los recursos hídricos en regiones de alta montaña, beneficiando tanto a las comunidades locales como a la biodiversidad.

## 2.4. Hipótesis

### 2.4.1. Hipótesis general

La infiltración influye significativamente en la capacidad de recarga hídrica en bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay, 2023.

### 2.4.2. Hipótesis especificas

- La tasa de infiltración del suelo es mayor durante la temporada de lluvias en comparación con la temporada seca en los bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay, 2023.
- La calidad del suelo, en términos de su capacidad para retener y filtrar agua, influye significativamente en la capacidad de recarga hídrica en los bofedales de la microcuenca Rontoccocha Abancay, 2023.

## 2.5. Variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variable*

| VARIABLES | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL | DIMENSIÓN | INDICADORES | ÍNDICE |
|---|---|---|---|---|---|
| Infiltración | La infiltración es el fenómeno en el cual el agua se desplaza desde la superficie del suelo hacia su interior. Este proceso se ve afectado por una serie de características, entre las que se incluyen la intensidad de la precipitación, el nivel de humedad del suelo, las condiciones superficiales del suelo y las propiedades intrínsecas del suelo mismo (ANA, 2009). | Para evaluar el proceso de infiltración, se empleará el infiltrómetro de doble anillo. Este método implica saturar una sección del suelo delimitada por dos anillos concéntricos y luego registrar los cambios en el nivel del agua dentro del cilindro interior. | - Características de la precipitación.<br>- Características del suelo | - intensidad<br>- duración<br>- distribución de espacio temporal<br>- Tipo de suelo.<br>- Textura suelo.<br>- Estructura<br>- Horizontes del suelo<br>- Uso del suelo | - mm/día<br>- min/día<br>- m<br>- Análisis de suelo<br>- Análisis de suelo<br>- Análisis de suelo<br>- Números<br>- ZEE- |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Recarga Hídrica | La recarga hídrica se refiere al proceso mediante el cual agua proveniente del entorno circundante se introduce en un acuífero. Este proceso está influenciado principalmente por las condiciones meteorológicas y las características físicas del terreno (SINGH, 2011) | Es fundamental llevar a cabo un análisis exhaustivo de la zona para estimar la recarga hídrica, considerando los datos disponibles que puedan ser empleados en dichas estimaciones | - Características de la superficie del suelo<br>- Condiciones meteorológicas. | - Cobertura vegetal.<br>- Geomorfología.<br>- Precipitación.<br>- Temperatura.<br>- Humedad. | - densidad por m2<br>- Escalas de representación<br>- Mm<br>- °C<br>- % de humedad |

# III. Marco teórico

## 3.1. Antecedentes

### 3.1.1. A nivel internacional

**Calderón** (2018), la tesis de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, destaca que la geomorfología de la sierra ecuatoriana proporciona las condiciones necesarias para la existencia de bofedales altoandinos. Uno de estos ejemplos es el páramo de Mojanda, ubicado en las provincias de Pichincha e Imbabura, a altitudes que oscilan entre los 2500 y 4260 metros sobre el nivel del mar. Este páramo alberga diversos ecosistemas, incluyendo lagunas y bofedales, cuya importancia radica en los beneficios que proporcionan, como la oferta hídrica, el almacenamiento de agua y la captura de carbono. La investigación realizada determinó que, en una superficie de 0,61 hectáreas, la oferta hídrica fue de 1149,72 metros cúbicos por año, mientras que, en 1,32 hectáreas de bofedal, la oferta hídrica fue de 2455,63 metros cúbicos por año. Sin embargo, estos valores fueron menores en comparación con otros lugares de la sierra ecuatoriana.

**Irineo** (2019)**,** la presente tesis realizó la caracterización morfológica, física, química y bacteriológica de los bofedales que se encuentran en diferentes comunidades que tiene el municipio. Los objetivos de la presente tesis fueron: Identificar los bofedales existentes en el municipio de Huarina. Determinar las características morfológicas, físicas, químicas y bacteriológicas de los bofedales identificados. Realizar el análisis físico químico bacteriológico del agua colectada de los bofedales. Determinar la población del caracol *Lynnaea truncatula* hospedero intermediario de la *Fasciola hepática* y bacteriológica en los bofedales del municipio de Huarina. Correlacionar los factores físicos, químicos, bacteriológicos y *Lymnaea*. Los bofedales estudiados en las comunidades del municipio de Huarina cuenta con bofedales naturales de pastoreo para la crianza de ganado vacuno, ovinos y otros animales del lugar. El método utilizado en esta investigación combina diversas fuentes de información, logrando una visión comprensiva sobre la situación actual y permitiendo aportar los distintos antecedentes que sirven como propuesta de manejo de los

bofedales. Por otra parte, se llevó muestras al laboratorio para su análisis, de los cuales, los resultados obtenidos son: superficie de 2402,12 ha, y el agua tiene un volumen de 9235,73 $m^3$, con Ph de 7,78, conductividad 247,83uS; en cuanto a las características químicas, se tiene gran variabilidad de datos en las 10 comunidades de estudio, los bofedales de la comunidad Apuvillque tienen gran porcentaje de bacterias, la presencia de caracoles en época seca y húmeda, la comunidad Villacollo tiene mayor porcentaje; en la correlación entre (conductividad–salinidad), (conductividad-calcio),(salinidad-calcio), (magnesio-sodio), (conductividad-cloruros), (salinidad-cloruros), (potasio-cloruros), todas las correlaciones son positivas a un nivel de significancia del 1% a medida que aumenta variable independiente aumenta la variable dependiente, la correlación negativa (temperatura del agua-óxidos disueltos), a medida que aumenta la temperatura del agua, disminuyen los óxidos disueltos.

**Oviedo** (2017)**,** la tesis de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas tuvo como objetivo principal elaborar propuestas de indicadores ambientales para evaluar la calidad de los humedales altoandinos, específicamente el humedal de Tibanica. Estos indicadores tuvieron en cuenta los componentes biológicos, físicos y sociales del ecosistema, con el fin de determinar un indicador de proyección que permitiera medir la eficacia de las acciones tomadas para su conservación. La investigación se enmarcó en un enfoque descriptivo-analítico. Durante el desarrollo de la investigación, se estableció que las condiciones del humedal de Tibanica, en cuanto a su oferta ambiental y sus capacidades de restauración (ya sea recuperación o rehabilitación), destacan la necesidad de intervención en todos los humedales debido a su alto valor ecológico y a la amplia gama de servicios ambientales que pueden ofrecer. Estos servicios incluyen oportunidades para la recreación pasiva, la educación a través de aulas ambientales y la investigación aplicada, gracias a su potencial.

**Hernández** (2021)**,** tesis de la Universidad de Manizales, tuvo como objetivo evaluar la percepción del conocimiento ambiental de los pobladores altoandinos del sector del Ocho en la cuenca hidrográfica del río Chinchiná, ubicada en el departamento de Caldas. La

investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo con énfasis en investigación social. Los resultados obtenidos revelaron que los humedales han sido afectados considerablemente por diversos factores, principalmente de origen antrópico, que afectan sus dinámicas funcionales. Se concluyó que estos ecosistemas presentan un deterioro evidente en términos de la calidad de sus servicios ecosistémicos debido a una variedad de actividades humanas desarrolladas en la zona.

**Imbaquingo** (2021)**,** en este estudio se presentaron las variaciones espacio-temporal de los bofedales correspondientes a la Subcuenca del Río Chambo, entre los años 2013-2020; se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 que fueron procesadas mediante el *software* ArcGis, con el fin de obtener la extensión superficial y conocer la intensidad de transición de estos ecosistemas. Se consideró la reflectancia arrojada por estos sistemas naturales, se elaboró una propuesta de conservación y manejo. Se indagó los cambios ocurridos mediante teledetección, evaluando los cambios en la cobertura espacial, hallándose fluctuaciones significativas en la parte occidental de la subcuenca. Mediante el cálculo de los índices de diferencia normalizada para vegetación (NDVI), agua (NDWI) y espectro infrarrojo (NDII), se estimó la cobertura de bofedales, obteniendo los siguientes valores por año: 2013 con 135 033,48 ha (37,61%), 2014 con 119 254,00 ha (33,22%), 2015 con 129 674,22 ha (36,12%), 2016 con 87 989,44 ha (24,51%), 2017 con 128 251,48 ha (35,73%), 2018 con 127 596,32 ha (35,54%), 2019 con 144 706,08 ha (40,31%) y 2020 con 17 573,76 ha (4,90%). Posteriormente fueron catalogados según el “Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental” delimitado en el área de investigación; se notó la predominancia en el ecosistema Herbazal del Páramo, con promedios anuales de: 13,86% de ganancias, 11% de pérdidas y 6,16% de persistencias. Se concluyó que, para un periodo de ocho años, existieron variaciones en la distribución de bofedales presentes en la subcuenca, la evidencia gráfica indicó una tendencia a la pérdida, la vulnerabilidad de estas áreas se atribuyó a la intervención antrópica y el cambio climático. Se recomendó ejecutar proyectos de conservación y restauración de los bofedales, con el fin de garantizar los

servicios ecosistémicos, vitales en las zonas de recarga hídrica; para precautelar la sostenibilidad ambiental de la zona estudiada.

### 3.1.2. A nivel nacional

**Calvo** (2018)**,** en la actualidad, los estudios sobre la evaluación del estado de salud de los ecosistemas de bofedales son escasos, a pesar de su gran importancia debido a la amplia gama de servicios ecosistémicos que proporcionan, así como por ser la principal fuente de alimentación para el ganado en los Andes del Perú. El impacto del cambio climático representa una seria amenaza para la integridad biótica de los bofedales, así como para su estructura y funcionamiento. A partir de este análisis, se concluyó que la metodología propuesta en esta investigación para la evaluación de los estados de salud es adecuada, ya que refleja el estado de la estructura y el nivel en que se encuentran las funciones ecológicas básicas, como la productividad, el ciclo hidrológico, la biodiversidad y la estabilidad del sistema ecológico. Los coeficientes de variación para cada uno de los atributos e indicadores evaluados por los expertos resultaron en su mayoría ser cero, lo que sugiere que no hubo diferencias significativas entre las opiniones de los expertos al calificar las comparaciones. Esto indica una alta consistencia entre los expertos. Además, los valores de los puntajes obtenidos con la metodología para estimar el estado de salud de los bofedales se distribuyen de manera coherente a lo largo de todos los estados transicionales, lo que demuestra que la metodología es consistente y no sobreestima el estado de salud real de los bofedales.

**Galarza** (2020)**,** la presente investigación se realizó en el bofedal sector Moya dentro del Santuario Histórico de Chacamarca que cuenta con una extensión de 24 ha, ubicado en los distritos de Junín y San Pedro de Cajas, en las provincias de Junín y Tarma respectivamente, departamento de Junín. El objetivo principal fue evaluar el estado de conservación del bofedal durante la época húmeda, el cual fue desarrollado en el mes de noviembre, mediante el método de “transecto al paso” empleando un anillo censador de dos cm de diámetro, para ello se establecieron nueve transectos repartidos aleatoriamente en tres zonas de muestreo dentro del bofedal, zona uno: se ubica al margen de la trocha

carrozable que conduce a la Cooperativa Agrícola San Francisco de Chichausiri usado como zona de pastoreo para ganado ovino y corral temporal para ganado equino, zona dos: ubicada en el centro del bofedal, el cual se encuentra dividida por cercos perimétricos para definir sector de pastoreo, corral y zona no pastoreada, zona tres: se ubica a extremo del bofedal durante la evaluación se registró como zona no pastoreada, obteniendo así 900 puntos de evaluación. Los resultados muestran que el bofedal se encuentra en condición regular para ganado ovino, por otro lado, la carga animal que soporta el bofedal sector Moya es de 1,5 UA/ha/año en relación al ganado ovino, asimismo, se registró en el bofedal 40 especies de flora, distribuidas en 27 géneros, pertenecientes a 15 familias, siendo las más diversas la familia *Asteraceae* con 10 especies, *Poaceae* con 6 especies y *Cyperaceae* con 4 especies, con respecto a la diversidad de alfa, se estimó mediante el índice de Simpson el cual presentó una baja dominancia con un valor de 0,9133, el índice de Shannon-Weiner presentó una diversidad alta con un valor de 4,1168 y en cuanto a la diversidad beta según el índice de Jaccard se determinó comparte en común entre las zonas de estudio 66% y 58% de similitud.

**Quispe** (2018)**,** la investigación aborda la importancia de los sistemas de bofedales para el desarrollo de los pobladores andinos desde perspectivas cultural, económica e histórica, considerándolos como fuentes de riqueza sostenible y científica. El estudio se llevó a cabo en los bofedales de Viluyo-Nuñoa Melgar y tuvo como objetivo determinar el valor del agua a partir de la función de producción, utilizando elementos climáticos y el balance hídrico determinado mediante el modelo de Cropwat y la función de producción. Se utilizó el método de valoración contingente empleando los modelos de Logit y Probit para estimar el DAP (Disposición a Pagar), obteniendo un valor promedio de DAP de S/ 22,35. Esto generó un valor agregado de S/ 1788,00 soles (equivalente a $ 541,80 dólares americanos), que servirían para el mantenimiento y conservación de los sistemas de bofedales.

**Omonte** (2022), la presente tesis se centra en la evaluación del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en tres profundidades de suelos en tres bofedales altoandinos. Se

trata de una investigación de tipo descriptivo-correlacional. Como conclusión, se registró un almacenamiento de COS (tC/Ha) por profundidad mayor en el bofedal Pantiumpampa (319,91 a 20 cm; 319,62 a 40 cm y 319,62 a 60 cm), seguido de Chaquirayoc (166,65 a 20 cm; 101,76 a 40 cm y 74,77 a 60 cm) y Churia (133,68 a 20 cm; 103,55 a 40 cm y 92,93 a 60 cm). Además, se observó una valoración total de COS por bofedal mayor en Pantiumpampa (959,15 tC/ha), seguido de Chaquirayoq (343,18 tC/ha) y Churia (330,16 tC/ha).

**Villasante** (2021)**,** la presente investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos del cambio climático sobre la salud y la cobertura de los bofedales ubicados en las alturas de Arequipa. Se llevaron a cabo análisis de imágenes satelitales entre los años 1985 y 2019, y los resultados de cobertura y salud se correlacionaron con datos meteorológicos obtenidos de la NASA para ambos lugares. Se determinó que no existe correlación entre las variables temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media. Como resultado final, propone la realización de un modelo de monitoreo para determinar las variaciones en el área y el estado de salud de los bofedales. Este modelo consta de dos etapas y diez pasos sucesivos, con el fin de establecer un sistema efectivo para la evaluación continua de estos ecosistemas en respuesta al cambio climático.

### 3.1.3. A nivel regional y local

**Sierra** (2019)**,** la tesis de la Universidad Tecnológica de los Andes tiene como objetivo general evaluar la recarga hídrica y la escasez del manante Marcamarca en la microcuenca Mariño, ubicada en la Provincia de Abancay, región Apurímac. Este estudio se enmarca dentro de un enfoque descriptivo y no experimental, empleando técnicas como observaciones directas y el método de polígonos de Thyssen. La investigación se llevó a cabo en la zona de la microcuenca Mariño, específicamente en el manante Marcamarca. La toma de muestras se realizó en el mencionado manante, utilizando herramientas como ArcGIS10.3 para determinar su ubicación. Se encontró que el manante se localiza al noreste de la ciudad de Abancay, dentro de la comunidad de Llanucancha, abarcando un área de

recarga hídrica de 506,87 hectáreas. Se estimó que hay una superficie de 2,37 hectáreas de bofedales en esta zona. Se identificaron 11 fuentes de agua, y el balance hídrico de la microcuenca Mariño revela un 60% de excedente de agua y un 40% de estabilidad de agua, con una escasez de agua del 0%. Aunque existe un recurso hídrico abundante, no se puede utilizar de manera proporcional. Se calculó que el valor promedio del manantial de Marcamarca es de 59,17 l/s, distribuidos en las zonas II-A y II-B de la ciudad de Abancay. En conclusión, la demanda de agua se estima en 10 882,37 $m^3$/hab, mientras que la oferta es de 9936 $m^3$, lo que genera un déficit de agua proyectado para el año 2022 de 946,37 $m^3$.

**Huayhua** (2021)**,** como consecuencia del sobrepastoreo que viene ocurriendo en la cabecera de la cuenca del río Mariño se están disminuyendo las áreas de cobertura vegetal la cual tiene una biodiversidad de especies que tienen que ver con la captación e infiltración del agua y estos problemas no han sido estudiados para esta región. Para conocer mejor y dar soluciones en este espacio territorial se estudiaron tres ecosistemas de mayor importancia como los pastizales o pajonales de puna, bofedales y los bosques nativos en donde predominan especies como la *Stipa ichu*, *Distichia muscoides* y *Polylepis racemosa*, y una vasta biodiversidad de otras especies. En este ecosistema también se presentan las costras biológicas (*biocrusts*) que permiten una adecuada regulación hídrica, mediante la captación del agua, disminución de la escorrentía e influencia directa en el proceso de infiltración y percolación del agua hacia el subsuelo, permitiendo una mayor oferta de agua en fuentes hídricas como manantiales ubicados en la cuenca media. Esta investigación tuvo como objetivo determinar el valor económico de los flujos hidrológicos, tomando como base a la biodiversidad funcional, para lo cual se determinó la oferta hídrica en los tres ecosistemas evaluados; la demanda de agua para fines agrarios y poblacionales; y, finalmente, la valoración económica del agua. En cuanto a la oferta hídrica en los ecosistemas de pastizal, bofedal y bosque nativo, generan una oferta hídrica total de 4 264 549 $m^3$/año, la demanda hídrica tanto agrícola como poblacional asciende a 4 498 956 $m^3$/año, generándose un déficit de agua de 239 038 $m^3$/año. Seguidamente, la valoración

económica del servicio de provisión hidrológica permitió determinar que el valor del agua en la cuenca Mariño es de S/ 0,51 $m^3$, el mismo que permitirá la generación de políticas públicas encaminadas a la conservación de la cabecera de cuenca del río Mariño. Con base a estos resultados en estos tres ecosistemas que predominan en la cabecera de cuenca del Mariño, se propone realizar actividades de manejo y conservación, tales como la clausura de praderas, para la recuperación de la cobertura vegetal, conservación de bofedales donde se encuentran los biocrusts y finalmente la reforestación con especies nativas como Polylepis racemosa.

## 3.2. Bases teóricas

**Infiltración,** la infiltración se define como el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del suelo hacia su interior. Inicialmente, este fenómeno ayuda a satisfacer las necesidades de humedad en la capa superficial del suelo. Una vez que se alcanza un nivel de saturación, el exceso de agua se incorpora al acuífero subterráneo, llenando los espacios vacíos disponibles (Custodio & Llamas , 1983).

Los principales factores que influyen en la infiltración del agua en el suelo son:

**Contenido de humedad del suelo:** la cantidad de agua ya presente en el suelo puede afectar la capacidad de infiltración, ya que los suelos saturados pueden tener una menor capacidad de absorción.

**Tipo y densidad de la cobertura del suelo:** la presencia de vegetación y la compactación del suelo pueden influir en la capacidad de infiltración. Por ejemplo, suelos cubiertos con vegetación tienden a tener una mayor capacidad de infiltración que suelos desnudos o compactados.

**Altura de la capa freática:** la profundidad a la que se encuentra el nivel freático puede afectar la capacidad de infiltración, ya que un nivel freático elevado puede limitar la absorción del agua en el suelo.

**Desarrollo de microorganismos del suelo:** la actividad biológica en el suelo, como la presencia de microorganismos, puede influir en la estructura del suelo y, por lo tanto, en su capacidad de infiltración.

Procesos de lixiviación: la lixiviación de minerales y otros materiales en el suelo puede dar lugar a la formación de capas de baja permeabilidad, conocidas como "harpanes", que pueden obstaculizar la infiltración del agua.

Debido a la influencia de diversos factores en el proceso de infiltración, determinar su valor con precisión resulta desafiante, a menos que se realicen mediciones directas para estimarlo con mayor certeza. (Gurovich, 1985).

**Fases del proceso de Infiltración**

Según Gurovich (1985), las fases de proceso de infiltración son:

**Intercambio**. En la superficie del suelo, el agua puede retornar a la atmósfera de varias formas. Una de ellas es a través de la evaporación directa, donde el agua se convierte en vapor debido a la energía térmica del sol. Además, el movimiento capilar dentro del suelo también puede impulsar la ascensión del agua hacia la superficie, contribuyendo a la evaporación. Otra vía importante es la transpiración de las plantas, donde el agua absorbida por las raíces es liberada a la atmósfera a través de los poros de las hojas durante el proceso de fotosíntesis. Estos mecanismos combinados participan en el ciclo hidrológico y son esenciales para mantener el equilibrio del agua en los ecosistemas terrestres.

**Transmisión.** Este fenómeno se refiere a la percolación del agua a través del suelo cuando la acción de la gravedad es más predominante que la fuerza capilar. En este caso, el agua se desplaza verticalmente a través del suelo hasta encontrar una capa impermeable que la detiene, lo que puede dar lugar a la formación de un nivel freático o a la acumulación de agua en una capa más profunda del suelo.

**Circulación**. Este fenómeno se conoce como flujo subsuperficial o flujo subterráneo. Ocurre cuando el agua se acumula en el subsuelo debido a la presencia de una capa impermeable que impide su movimiento vertical hacia abajo. Posteriormente, el agua

comienza a circular horizontalmente, influenciada por la gravedad, siguiendo las leyes del flujo subterráneo. Se desplaza a través de los poros y grietas del suelo en busca de una salida, como un arroyo, un manantial o una fuente de agua superficial.

**Capacidad de infiltración.** La capacidad de infiltración se refiere a la máxima cantidad de agua que un suelo puede absorber en condiciones específicas. Este valor varía con el tiempo debido a factores como la humedad del suelo, el tipo de material que lo compone y su grado de compactación. Conforme continúa la precipitación, la capacidad de infiltración tiende a disminuir hasta alcanzar un valor casi constante, momento en el cual comienza el escurrimiento del agua.

La lluvia que supera la capacidad de infiltración se llama lluvia neta, ya que es la que finalmente se convierte en escorrentía. La precipitación que cae durante el período en que hay escorrentía se denomina lluvia efectiva. Por lo tanto, la lluvia neta representa la cantidad total de lluvia que se transforma en escorrentía.

**Figura 1**

*Curva de Infiltración*

***Fuente:*** (Gurovich, 1985)

**Nota.** La figura muestra la curva de la capacidad de infiltración.

### Factores que afectan la Infiltración

Según Chow (1996), los factores que afectan a la infiltración, entre las cuales tenemos:

**Tipo de suelo**. A medida que aumenta la porosidad del suelo, es decir, la cantidad de espacios vacíos entre las partículas del suelo, junto con el tamaño de estas partículas y el grado de fisuramiento del suelo, su capacidad de infiltración también aumenta. Este fenómeno se debe a que los espacios vacíos facilitan que el agua se filtre a través del suelo de manera más eficiente, mientras que las partículas más grandes y las fisuras proporcionan rutas adicionales para el movimiento del agua. Por lo tanto, estos factores son determinantes para la capacidad de un suelo de absorber y retener agua.

**Grado de humedad del suelo**. La capacidad de infiltración del suelo suele variar de manera inversamente proporcional a su nivel de humedad. Esto implica que un suelo con alta humedad generalmente tendrá una capacidad de infiltración menor que un suelo más seco. Cuando el suelo está saturado de agua, los poros se encuentran ocupados y no pueden absorber más líquido, lo que reduce su capacidad de infiltración. Por el contrario, en un suelo menos húmedo, los poros están disponibles para absorber el agua, lo que aumenta su capacidad de infiltración. Es crucial tener en cuenta esta relación al analizar el comportamiento hidrológico del suelo en distintas condiciones.

**Presencia de sustancias coloidales**. La hidratación de los coloides del suelo, como las arcillas, provoca un aumento en su tamaño al absorber agua. Este aumento en el tamaño de los coloides reduce el espacio disponible entre las partículas del suelo, lo que a su vez disminuye la capacidad de infiltración del agua. Cuando los coloides se hinchan debido a la hidratación, pueden obstruir los poros del suelo, dificultando la penetración del agua a través de ellos. Esto puede tener un impacto significativo en la capacidad de infiltración del suelo y en los procesos hidrológicos asociados.

**Acción de la precipitación sobre el suelo**. El impacto del agua de lluvia al golpear el suelo puede ocasionar la compactación de su superficie, lo que a su vez disminuye su capacidad de infiltración. Además, el agua de lluvia puede arrastrar consigo materiales finos,

como arcillas y limos, que tienden a obstruir los poros del suelo, reduciendo así su porosidad y capacidad de infiltración. Este proceso de compactación y obstrucción de los poros puede resultar en una superficie más densa y menos permeable, lo que aumenta la resistencia a la penetración del agua y dificulta su absorción en el suelo.

**Cubierta vegetal**. Una densa vegetación ejerce varios efectos positivos sobre la infiltración del agua en el suelo y el escurrimiento superficial. En primer lugar, las plantas protegen la superficie del suelo de la erosión causada por la lluvia al interceptar las gotas de agua y reducir su impacto directo. Además, las raíces de las plantas crean canales y poros en el suelo, aumentando su permeabilidad y facilitando la infiltración del agua. Después de la lluvia, las raíces absorben la humedad del suelo, lo que ayuda a reducir la saturación superficial y aumenta la capacidad de infiltración para futuras precipitaciones. En resumen, una densa vegetación no solo favorece la infiltración del agua en el suelo, sino que también contribuye a regular el ciclo hidrológico y prevenir la erosión del suelo.

**Acción del hombre y de los animales**. En su estado natural, el suelo cuenta con una configuración que favorece la infiltración del agua, caracterizada por un alto contenido de materia orgánica y la presencia de poros de mayor tamaño. Cuando se maneja de manera adecuada, este proceso de infiltración se promueve, permitiendo que el agua se absorba fácilmente en el suelo y recargue los acuíferos subterráneos.

**Temperatura**. Las temperaturas bajas pueden obstaculizar la infiltración del agua en el suelo. No obstante, es crucial tener en cuenta la textura del suelo, que se refiere a cómo están distribuidas las partículas que lo componen, como la arena, el limo y la arcilla. Esta composición tiene un impacto importante en la capacidad de infiltración del suelo, independientemente de las condiciones de temperatura.

**Tabla 2**

*propiedades físicas del suelo*

| Textura del suelo | Densidad Aparente | Capacidad de Campo |
|---|---|---|
| Arenoso | 1.55 - 1.80 | 6 – 12 |

| | | |
|---|---|---|
| Franco – Arenoso | 1.40 - 1.60 | 10 – 18 |
| Franco | 1.35 – 1.50 | 18 – 26 |
| Franco – Arcilloso | 1.30 – 1.40 | 23 – 31 |
| Arcilloso – Arenoso | 1.25 – 1.35 | 27 – 35 |
| Arcilloso | 1.20 – 1.30 | 31 – 39 |

**Fuente:** (Chow, 1996)

**Nota.** Esta tabla muestra la estratificación del suelo.

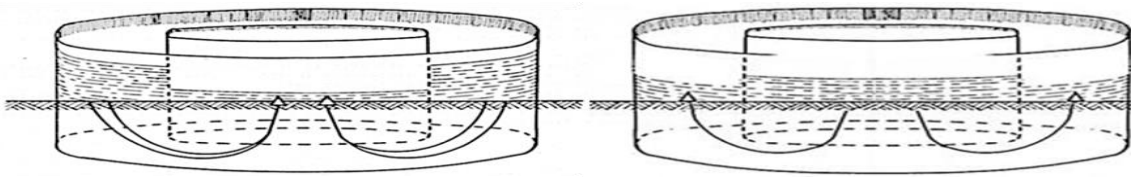
**Método para determinar la infiltración**

Los métodos disponibles para calcular la capacidad de infiltración en una cuenca se basan en la relación entre la precipitación y el escurrimiento. Sin embargo, en la práctica, analizar esta relación de manera detallada puede ser complicado y está sujeto a ciertas limitaciones, especialmente en cuencas pequeñas donde se presentan tormentas sucesivas. Para realizar cálculos de infiltración de manera adecuada, se requiere disponer de datos como histogramas de precipitación media junto con sus correspondientes hidrogramas, lo que implica la necesidad de contar con equipos como fluviógrafos y estaciones de aforo en la salida de la cuenca (Gurovich, 1985).

Los anillos de infiltración son dispositivos que constan de dos anillos concéntricos, cada uno con una altura de 25 cm. El anillo exterior tiene un diámetro de 60 cm, mientras que el anillo interior tiene un diámetro de 30 cm. Además, se utiliza una boya con una escala graduada en centímetros y milímetros para realizar las mediciones. Durante el procedimiento, se introduce una porción de suelo limitada por los dos anillos concéntricos y se satura con agua. Luego, se mide la variación del nivel del agua en el cilindro interior para evaluar la tasa de infiltración del suelo (Reynolds, 1991)

**Figura 2**

*Efecto de la diferencia de niveles de agua*



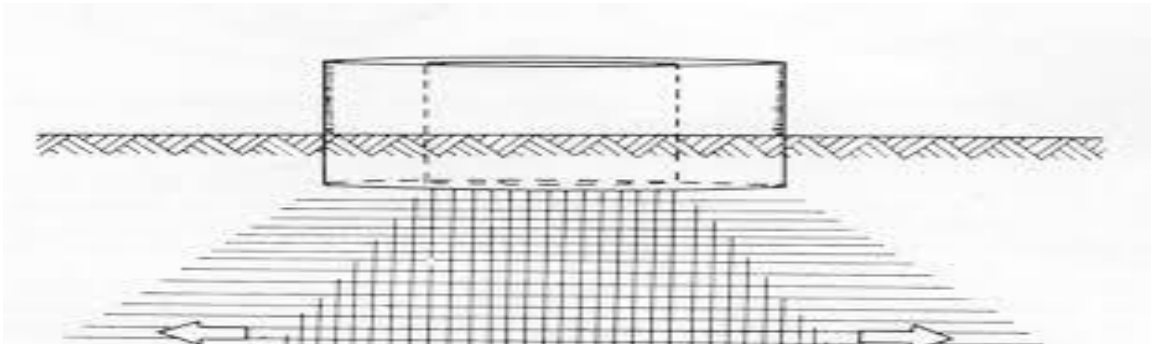
a). El flujo entra hacia el anillo interior  b). El flujo abandona del anillo interior

**Fuente:** (Reynolds, 1991)

**Nota.** La figura muestra anillos infiltrómetros

**Figura 3**

*Flujo de agua*

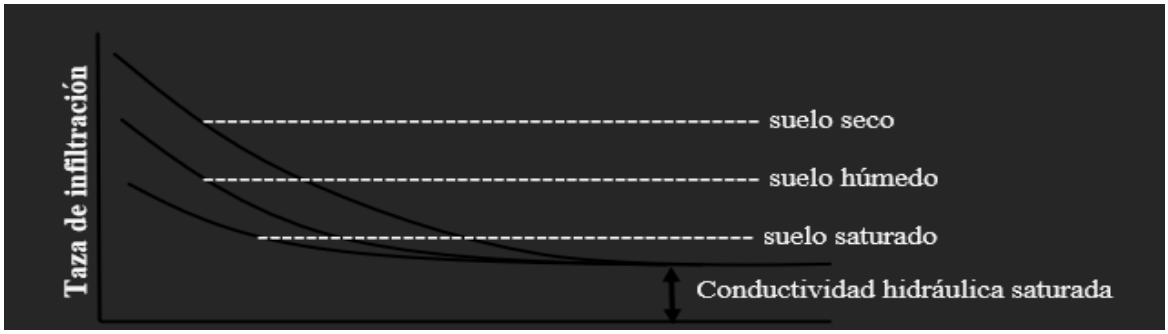


**Fuente:** (Reynolds, 1991)

**Nota.** Se muestra flujo de agua en el suelo generado por el doble anillo

**Figura 4**

*Evolución de la tasa de infiltración*




**Fuente:** (Reynolds, 1991)

**Nota.** Se muestra la evolución de la tasa de infiltración.

El tiempo requerido para alcanzar las condiciones finales de saturación dependerá de varios factores, incluida la humedad inicial del suelo, su textura y estructura, el espesor del horizonte a través del cual se desplaza el agua y la altura del agua en el anillo interior del suelo. Estos elementos influirán en la velocidad a la que el agua puede infiltrarse y moverse a través del suelo, afectando así el tiempo necesario para que el suelo alcance su capacidad máxima de retención de agua (Reynolds, 1991)

**Ecuación de Kostiakov**. La velocidad de infiltración se define como la capacidad de un terreno para absorber agua desde su superficie hacia el interior del suelo. En términos sencillos, representa la relación entre la cantidad de agua que se infiltra y el tiempo necesario para que este proceso ocurra. Por lo general, esta velocidad se expresa en unidades como centímetros por hora o milímetros por minuto (Delgadillo & Pérez, 2016).

La tasa de infiltración no permanece constante; en su lugar, tiende a disminuir gradualmente a medida que pasa el tiempo durante la aplicación continua de agua en el suelo. Al representar gráficamente las tasas registradas en función del tiempo, se observa una curva que puede ser adecuadamente modelada utilizando el modelo potencial descrito en la ecuación 1. Al graficar este modelo potencial, se obtiene una curva que representa la tasa de infiltración. La tasa de infiltración instantánea corresponde al valor puntual obtenido en un momento específico al introducir dicho momento en la curva representativa (Delgadillo & Pérez, 2016).

El modelo propuesto por Kostiakov en 1932, ha sido ampliamente reconocido. Aunque existen otros modelos disponibles para representar la infiltración en el suelo, la ecuación empírica de infiltración de Kostiakov ha demostrado ser especialmente útil y práctica para aplicaciones de riego. Esta ecuación ha arrojado valores confiables dentro de un rango de 25 a 125 mm de infiltración acumulada, lo cual se ajusta adecuadamente a los valores típicos utilizados en sistemas de riego, especialmente en la superficie del suelo (Delgadillo & Pérez, 2016).

$$I = at^b$$ Ecuación (1)

Donde:

- I = representa la velocidad de infiltración, expresada en mm/hora, cm/hora, u otras unidades de medida similares.

- t = es el tiempo de oportunidad, es decir, el tiempo durante el cual el agua está en contacto con el suelo, expresado en minutos u horas.

- 'a' = es un coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial de tiempo.

- 'b' = es un exponente adimensional que varía en función de las características del suelo, generalmente oscilando entre 0 y -1.

**Infiltración acumulada**. La variable, también llamada lámina infiltrada acumulada, se calcula sumando los valores puntuales de infiltración obtenidos de la curva de velocidad de infiltración instantánea. La ecuación para la infiltración acumulada (ecuación 2) se deriva al determinar el área bajo esta curva, es decir, integrando su ecuación entre los límites especificados: $t_{inicial}$ = 0 y el $t_{final}$ (Delgadillo & Pérez, 2016).

Partiendo de la ecuación 1:

$$I = at^b$$

Definiendo el área y la integral:

$$\mathrm{A} = \sum_{\mathrm{to}}^{\mathrm{t}} \mathrm{dt} * I = \int_{\mathrm{to}}^{\mathrm{t}} 1^{*}\,\mathrm{dt}$$

Reemplazando en la integral:

$$\mathrm{A} = \mathrm{Icum} = \int_{\mathrm{to}}^{\mathrm{t}} at^2 * \mathrm{dt}$$

Integrando:

$$Icum = \left(\frac{a}{b+1}\right).t^{b+1}$$

Simplificando se obtiene:

$$\boldsymbol{Icum = at^{B}} \qquad Ecuación\ (2)$$

Dónde:

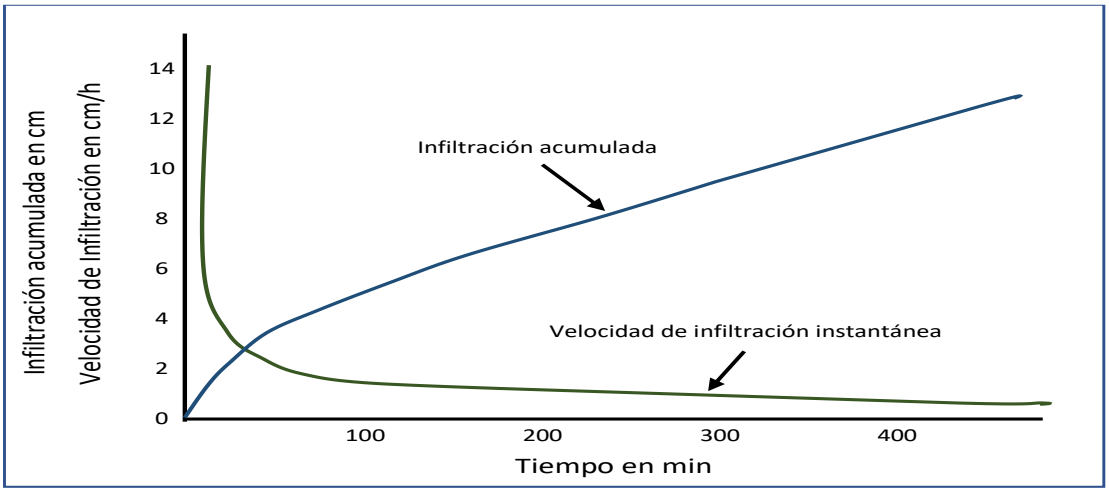
B = b + 1; 0 < B < 1

A = a / B

Para una mejor comprensión de la relación entre la velocidad de infiltración instantánea y la infiltración acumulada, se grafican ambas curvas (ver Figura 5):

***Figura 1***

***Velocidad de infiltración.***




**Fuente:** (Delgadillo & Pérez, 2016).

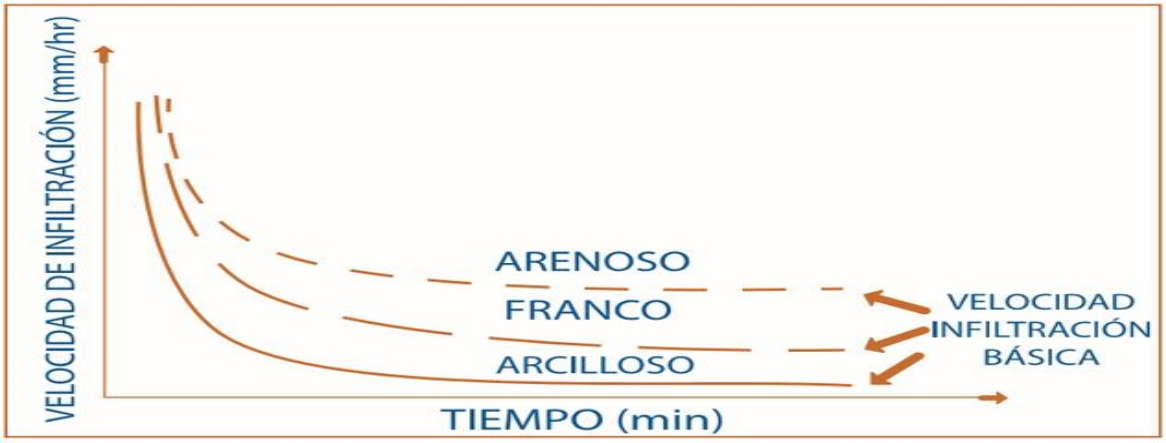
**Nota.** Se muestra velocidad de infiltración por la textura del suelo.

**Velocidad de infiltración básica.** Al iniciar la aplicación de agua, la tasa de infiltración es alta. Conforme aumenta el contenido de agua en el suelo, esta tasa disminuye gradualmente hasta alcanzar un valor constante conocido como velocidad de infiltración básica. Según la definición del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la velocidad de infiltración básica se refiere a la velocidad a la cual el agua se infiltra en el suelo cuando la variación en esta tasa con respecto al tiempo es mínima y constante. Esta condición de infiltración se alcanza generalmente cuando el suelo está saturado hasta su capacidad de campo. Gráficamente, la velocidad de infiltración básica se identifica cuando la curva de la tasa de infiltración se vuelve asintótica hacia la horizontal. La velocidad de infiltración básica está estrechamente relacionada con

la textura del suelo; por lo tanto, el tiempo necesario para alcanzar esta velocidad y su valor dependerán de la textura del suelo (Delgadillo & Pérez, 2016).

**Figura 5**

*Variación de la curva de velocidad*




**Fuente:** (Delgadillo & Pérez, 2016).

**Nota.** Se muestra velocidad de infiltración por la textura del suelo.

La velocidad de infiltración básica es esencial para el diseño y los cálculos relacionados con el riego por aspersión y el riego superficial. Es crucial determinar de manera consistente su valor. Según el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la velocidad de infiltración básica es el valor instantáneo que corresponde al tiempo en que la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración en función del tiempo es igual a -10% de su valor. En otras palabras, es la velocidad de infiltración registrada cuando, dentro de un período de una hora, se produce un cambio igual o menor al 10% en la velocidad de infiltración (Delgadillo & Pérez, 2016).

Para determinar el tiempo en el cual se alcanza la velocidad de infiltración básica, se iguala la primera derivada de la ecuación (1) con la misma ecuación multiplicada por -0,1:

$$\frac{dI}{dt} = -0.1\mathrm{I}$$

Donde $dI/dt$ representa la primera derivada de la velocidad de infiltración respecto al tiempo t, e I es la velocidad de infiltración en ese momento. Este proceso permite encontrar el tiempo en el cual la velocidad de infiltración alcanza el 10% de su valor original:

Reemplazando:

$$\frac{d(at^b)}{dt} = -0.1(at^b)$$

Simplificando se tiene que:

$$t_b = -10b \qquad Ecuacion\ (3)$$

Dónde:

$t_b$: El tiempo obtenido en horas para alcanzar la infiltración básica se puede encontrar resolviendo la ecuación

$$\frac{dI}{dt} = -0.1\mathrm{I}$$

Una vez que se ha determinado el tiempo adecuado, este se puede utilizar para sustituirlo en la ecuación general de infiltración (ecuación 1). Este procedimiento nos permite obtener la ecuación específica de la velocidad de infiltración básica.

$$I_b = a(-10b)^b \qquad Ecuacion\ (4)$$

Es adecuado señalar que "b" representa el exponente relacionado con la ecuación de velocidad de infiltración del suelo. No obstante, en numerosas ocasiones, se busca determinar la función de infiltración acumulada. Por lo tanto, resulta imperativo derivar los valores de "b" y "a" de la ecuación de infiltración acumulada (A y B) de la siguiente forma:

$$Icum = \left(\frac{a}{b+1}\right).t^{b+1}$$

Tenemos que:

B = b + a; 0 < B < 1

$A = \frac{a}{B}$

Entonces: de la infiltración del agua en el suelo – Método de la

B = B – 1; -1 < b < 0

A = A * B

***Con el fin de ofrecer una referencia, se presentan en la Tabla 3 los intervalos de infiltración básica correspondientes a distintos tipos de suelo.***

**Tabla 3**

*Rangos de velocidad*

| Tipo de Suelo | mm/h |
|---|---|
| Arenoso | Más de 30 |
| Franco – Arenoso | 20 - 30 |
| Franco | 10 a 20 |
| Franco – Arcilloso | 5 a 10 |
| Arcilloso | 1 – 5 |

**Fuente:** (Delgadillo & Pérez, 2016).

**Nota.** Se muestra rangos de velocidad de infiltración de los diferentes tipos de suelo

**Bofedales.** Los bofedales se definen como ecosistemas de pastizales naturales húmedos que mantienen agua de manera permanente. Reciben agua de diversas fuentes, como manantiales, deshielo de glaciares, ríos y precipitaciones pluviales. (Alzérreca & Luna, 2001). Se ubican en la región Altoandina, entre los 3800 metros sobre el nivel del mar y los pies de los glaciares, distribuidos en Perú, Bolivia y Argentina. Son reconocidos como ecosistemas altamente productivos y socialmente significativos, proporcionando servicios ambientales clave como la regulación del ciclo hidrológico y la protección del suelo. Además, albergan grandes reservas de carbono y son vitales para la crianza de ganado, una actividad económica crucial en la región.

Los bofedales son formaciones vegetales que crecen en suelos principalmente orgánicos, con saturación de agua permanente, y muestran una rica diversidad biológica en comparación con su entorno circundante (Alegría y otros, 2000).

Según la definición establecida por Medina et al. (2023), cualquier humedal situado por encima de los 3800 metros sobre el nivel del mar se considera un bofedal. Esto incluye extensiones de marismas, pantanos, turberas y cuerpos de agua dulce, salobre o salada,

tanto naturales como artificiales, permanentes o temporales, estancados o en movimiento, así como áreas marinas poco profundas con una profundidad de marea baja de hasta seis metros.

De acuerdo con la legislación peruana, los bofedales se consideran ecosistemas frágiles que están sujetos a la influencia de procesos naturales, como el cambio climático, que conlleva al retroceso glaciar y a una mayor contaminación de estos ecosistemas (Flores, Ñaupari, & Tácuna, 2015). En el contexto peruano, los bofedales ocupan aproximadamente el dos por ciento del territorio Altoandino y se destinan principalmente al pastoreo de ganado doméstico, como alpacas, llamas y ovejas, que representan una parte fundamental de las economías rurales.

**Tipos de bofedales.** Según la Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca (2023), los bofedales se clasifican en cinco tipos utilizando distintos criterios: origen, tamaño, receptividad, altitud y nivel de pH.

**Por su origen**. Los bofedales pueden surgir tanto de manera natural, como resultado de la inundación por el deshielo de los nevados, como de manera artificial, construidos y regados por los campesinos. Estos ecosistemas se ubican en zonas topográficamente deprimidas y cerradas, donde diversos procesos geológicos, tales como geomorfológicos, tectónicos, hidrogeológicos y litológicos, permiten el almacenamiento o retención del agua. La fuente de agua para estos bofedales puede ser tanto subterránea como superficial, resaltando la importancia de las aguas subterráneas en la formación y evolución de la mayoría de ellos.

Existen diversos tipos de bofedales, incluyendo los kársticos, que presentan formas redondeadas y profundidades variables; los de origen fluvial, que siguen formas alargadas a lo largo de la corriente principal y suelen tener poca profundidad; y los de origen glaciar, que exhiben formas semicirculares y son más profundos (Alegría y otros, 2000).

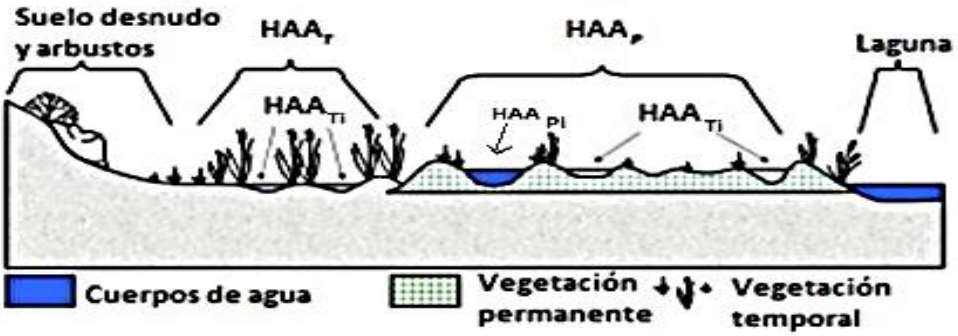
**Por su tamaño.** Los bofedales pueden dividirse en dos categorías principales: grandes y pequeños. Los bofedales grandes suelen ser compartidos por varias familias,

aunque la propiedad del ganado suele ser individual. Por el contrario, los bofedales pequeños se encuentran en propiedades familiares y son exclusivamente utilizados y cuidados por el propietario. Algunos bofedales se localizan en los fondos de valles junto a arroyos y suelen ser de menor tamaño. En estos casos, las principales fuentes de agua son la descarga subterránea, el deshielo y las corrientes superficiales. Por otro lado, están los bofedales de cuenca, que son de mayor tamaño y reciben agua de deshielo de glaciares ubicados en elevaciones más altas, así como descargas de aguas subterráneas asociadas a los sistemas de flujo regional (Alegría y otros, 2000).

**Por su receptividad.** Los bofedales exhiben una notable variabilidad dependiendo de la disponibilidad de agua en un año determinado, siendo la precipitación, la temperatura y la humedad factores críticos en distintas regiones. Dentro de esta clasificación, se distinguen los bofedales hidrofórmicos, situados en la ecorregión Puna húmeda, y los bofedales mésicos, presentes en la ecorregión puna seca. (Garcia & Otto, 2015), se reconocen dos tipos de humedales altoandinos (HAA): perennes y temporales. Esta diferenciación se fundamenta en las fluctuaciones estacionales de la vegetación activa fotosintéticamente y la disponibilidad temporal o permanente del agua. Estos humedales muestran subtipos, destacando el humedal altoandino temporal, sujeto a inundaciones temporales, y el humedal altoandino permanente, el cual puede dividirse en dos subtipos: temporalmente inundado y permanentemente inundado, como se muestra en la figura 8.

**Figura 6**

*Esquema de la clasificación de bofedales*




**Fuente:** (Garcia & Otto, 2015)

**Nota.** Se muestra clasificación de los humedales

**Por su altitud**. Los bofedales del tipo altiplano se encuentran en altitudes que van desde los 3800 hasta los 4100 metros sobre el nivel del mar. Por otro lado, los bofedales del tipo altoandino se ubican en altitudes comprendidas entre los 4100 y 4500 metros sobre el nivel del mar.

**Por su grado de PH**. En función del promedio de acidez y alcalinidad del suelo de cada bofedal, se pueden clasificar en tres categorías: ácidos, neutros y alcalinos. Los bofedales ácidos tienen un pH menor a 6,5, mientras que los bofedales neutros tienen un pH que oscila entre 6,6 y 7,3. Los bofedales alcalinos tienen valores de pH mayores a 7,4

**Unidad hidrográfica**

**Cuenca.** La cuenca de drenaje de una corriente se refiere al área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se reúnen para formar un único curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, que abarca todos los puntos de su recorrido (Villón , 2002).

**Cuenca hidrográfica.** Una cuenca hidrográfica se describe como una región geográfica donde se recogen y dirigen las aguas de la lluvia hacia un único cauce principal de agua. Esta área del territorio está configurada por una red de cursos de agua entrelazados que se definen según la estructura del relieve del terreno. Los límites de una cuenca, también

conocidos como divisorias de aguas, son establecidos por la geografía natural y representan las zonas más altas que circundan el curso principal del agua (Villón , 2002).

**Cuenca hidrológica.** La noción de cuenca hidrológica abarca un alcance más amplio y comprensivo que la de cuenca hidrográfica. Estas cuencas hidrológicas se consideran unidades morfológicas integrales que, además de englobar todos los elementos de la cuenca hidrográfica, también incluyen la totalidad de la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero. Desde una perspectiva de dinámica hidrológica, es posible identificar tres zonas funcionales distintas dentro de una cuenca (Villón , 2002).

**Zona de captación de cabecera o cuenca alta.** Las regiones cercanas a la divisoria de aguas o parteaguas, situadas en la parte más alta en términos de altitud de la cuenca, son conocidas como zona de cabecera. Esta área engloba sistemas montañosos y colinas. Es aquí donde se originan los primeros escurrimientos, como arroyos, una vez que los suelos han absorbido y retenido toda el agua que pueden según su capacidad (García & Otto, 2015).

**La zona de almacenamiento, de transición o cuenca media**. Este sector es conocido como la zona de confluencia y representa una transición entre la parte superior y la inferior de la cuenca. Aquí, los flujos iniciales procedentes de diversas subcuencas se unen, aportando diferentes caudales que pueden variar en la concentración de sedimentos, contaminantes y materia orgánica, dependiendo de las actividades desarrolladas en cada subcuenca. La zona de confluencia se caracteriza por ser un área de transporte y erosión, donde los flujos de agua pueden generar procesos de erosión y transporte de materiales hacia la parte inferior de la cuenca (Villón , 2002).

**Zona de descarga, de emisión o cuenca baja.** La zona de desembocadura se caracteriza por ser el lugar donde el río principal vierte sus aguas hacia el mar o un lago. Esta área es de gran importancia para diversos ecosistemas, como los humedales terrestres y costeros. Además, suele ser altamente productiva para la agricultura y otros fines humanos. La desembocadura también actúa como un punto de acumulación de los impactos ambientales de toda la cuenca hidrográfica, ya que los contaminantes y sedimentos

transportados por el río se depositan en esta área al final de su recorrido (García & Otto, 2015).

**Zona de recarga hídrica.** La recarga de un acuífero es el proceso mediante el cual se introduce agua externa al acuífero. Esta recarga puede originarse de varias fuentes, siendo la infiltración de la lluvia la más importante en la mayoría de los casos. Sin embargo, también puede ocurrir a través de la infiltración de aguas superficiales y la transferencia de agua desde otros acuíferos o sistemas interconectados. La degradación de las áreas de recarga en las cuencas hidrográficas, junto con la contaminación y la baja eficiencia en el uso del recurso hídrico, está causando una disminución en la disponibilidad de agua. Factores como la erosión del suelo, la deforestación y la compactación contribuyen al deterioro de estas zonas. En el ciclo hidrológico convencional, el agua entra al acuífero en áreas de recarga, se mueve lentamente a través del manto freático y emerge en áreas de descarga, como manantiales y fuentes. La cantidad de recarga de un acuífero está influenciada por la extensión del área de captación y la permeabilidad del suelo. Las áreas de mayor recarga, generalmente en zonas montañosas con alta precipitación, son cruciales para conservar la disponibilidad y calidad del agua subterránea. Proteger estas áreas es fundamental para prevenir la contaminación y garantizar un suministro sostenible de agua (Custodio & Llamas , 1983).

**Zonas de recarga hídrica superficial**: En términos generales, la mayor parte de la cuenca hidrográfica contribuye a la recarga del acuífero, salvo las áreas completamente impermeables. Estas zonas se saturan de agua tras cada precipitación, lo que provoca la escorrentía superficial, que está influenciada por factores como la topografía del terreno y la saturación del suelo. La medición de este flujo se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial o caudal de escorrentía superficial.

**Zonas de recarga hídrica sub-superficial**. Las áreas dentro de la cuenca que cuentan con suelos capaces de retener o almacenar agua en la superficie, sobre una capa impermeable, facilitan la concentración del flujo horizontal en el subsuelo hacia el sistema

de drenaje aguas abajo. Este proceso permite la generación de caudales en los cursos de agua incluso después de que cese la precipitación, ya que el flujo está influenciado por la cantidad de lluvia recibida y por la capacidad de retención del suelo para liberar el agua gradualmente a medida que se desplaza horizontalmente. Estos caudales pueden medirse de manera similar a como se ha descrito anteriormente y pueden producirse tanto después de episodios de lluvia como durante épocas secas, especialmente cuando el agua procede de áreas boscosas. En este contexto, se identifica la infiltración como el proceso de movimiento del agua a través del suelo o del subsuelo. El flujo horizontal en esta zona se considera como la recarga de agua, mientras que el flujo vertical está asociado con la escorrentía subterránea.

**Zonas de recarga hídrica subterránea**. Se hace mención a áreas dentro de la cuenca, como llanuras o depresiones, así como a rocas permeables, donde el flujo vertical durante la infiltración es considerable, siendo este proceso el responsable de la creación y el suministro de los acuíferos. Un aspecto crítico en esta clasificación es la conexión entre los acuíferos y la recarga externa, que puede originarse en otras cuencas. Para evaluar estas áreas, se pueden emplear dos enfoques: uno directo, que involucra sondeos, bombeos y técnicas de prospección geofísica, y otro indirecto, basado en el balance hidrogeológico.

**Zonas de recarga hídrica sub-subterránea**. Se refiere a áreas dentro de la cuenca donde se identifican fallas geológicas prominentes o donde el análisis del balance hidrogeológico indica una pérdida sustancial debido a la percolación profunda. Estas regiones suelen coincidir con las áreas de recarga subterránea.

## 3.3. Definición de términos

**Biomasa.** Se refiere a la cantidad de biomasa generada y almacenada por la vegetación en una región específica (Villón , 2002).

**Cobertura vegetal.** Se trata de la cubierta vegetal natural que se extiende sobre la superficie terrestre, incluyendo una amplia variedad de grupos funcionales que engloban diferentes especies de plantas (Villón , 2002).

**Tasa de infiltración.** Se refiere a la velocidad promedio a la que el suelo puede absorber el agua disponible en la superficie y transportarla hacia el interior del suelo, lo que resulta en una reducción de la escorrentía superficial del agua (Villón , 2002).

**Densidad del suelo.** Se refiere a un indicador que explica la relación entre el peso de las partículas sólidas presentes en el suelo y el volumen que ocupan estas partículas. Este parámetro está asociado a la porosidad del suelo, ya que un suelo altamente poroso tiende a tener una densidad menor (García & Otto, 2015).

**Capacidad.** La capacidad de retener o contener una cantidad específica de alguna sustancia hasta un límite determinado se conoce como capacidad de retención o capacidad de almacenamiento (García & Otto, 2015).

**Cilindro.** Es una figura geométrica que consta de una superficie lateral curvada y cerrada, junto con dos superficies planas paralelas que forman sus extremos. Se refiere especialmente al cilindro circular (García & Otto, 2015).

**Cuenca hidrográfica.** Se refiere a una unidad territorial de gestión definida principalmente por la red de drenaje en la superficie del terreno, donde interactúan de manera integral los aspectos biofísicos, socioeconómicos y ambientales entre los seres humanos, los recursos naturales y los ecosistemas. El agua actúa como un recurso que conecta y sistematiza la cuenca en su conjunto (García & Otto, 2015).

**Cuenca hidrológica.** Las cuencas hidrológicas no solo representan unidades morfológicas completas que engloban el concepto de cuenca hidrográfica, sino que también abarcan en su totalidad la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero (García & Otto, 2015).

**Cuenca.** Se refiere a un área geográfica que es drenada por un solo sistema de drenaje natural, lo que significa que todas sus aguas fluyen hacia el mar a través de un solo río o desembocan en un único lago endorreico. La delimitación de una cuenca hidrográfica se realiza mediante la línea de las cumbres, también conocida como divisoria de aguas (García & Otto, 2015).

**Escorrentía.** Se refiere al agua de lluvia que fluye libremente sobre la superficie de un terreno, sin ser absorbida por el suelo (García & Otto, 2015).

**Infiltración.** La infiltración es el fenómeno mediante el cual el agua o cualquier otro líquido atraviesa el suelo, un cuerpo u otro material sólido (Villón , 2002).

**Infiltró metro.** Un infiltrómetro es un instrumento utilizado para evaluar la capacidad de infiltración de los suelos. Hay diversos tipos de infiltrómetros, incluyendo el infiltrómetro de cilindro o de inundación, que puede ser de cilindro simple o de doble cilindro (Villón , 2002).

**Precipitación.** En meteorología, se hace referencia a la precipitación como cualquier tipo de fenómeno hidrometeorológico que se origina en la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno engloba una variedad de formas, como lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo, pero no incluye la neblina ni el rocío, ya que se consideran formas de condensación y no se clasifican como precipitación (Villón , 2002).

**Recarga hídrica.** se refiere al proceso mediante el cual se incorpora agua procedente del exterior del acuífero hacia su interior. Este proceso es fundamental para la renovación de los recursos hídricos subterráneos, ya que permite la reposición del agua almacenada en el acuífero (Villón , 2002).

**CUBHIC.** La metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas) representa una innovación en el campo de los proyectos de Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica. Proporciona un enfoque práctico para calcular de manera cuantitativa los beneficios hidrológicos derivados de este tipo de proyectos.

# IV. Metodología

## 4.1. Tipo y nivel de investigación

### Tipo

El presente trabajo de investigación se clasifica como aplicativo, ya que implica la evaluación directa de la variable independiente para observar sus efectos sobre la variable dependiente (Carrasco Díaz, 2009).

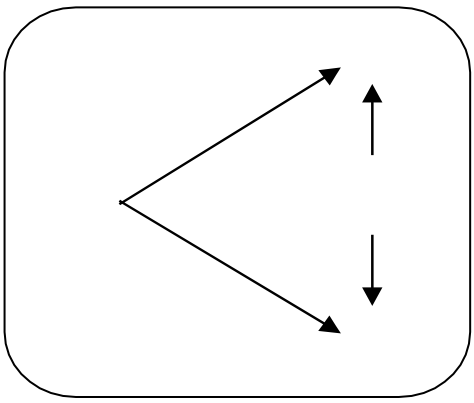
### Nivel

El presente estudio de investigación se enmarca en el nivel de investigación correlacional-causal, cuyo propósito es describir las relaciones entre dos o más variables en un punto específico del tiempo. Este enfoque implica no solo descripciones de variables individuales, sino también de sus relaciones, ya sean de naturaleza puramente correlacional o de causalidad (Baptista y otros, 2014).

### Diseño de investigación

Por consiguiente, el diseño de la presente investigación se enmarca en la categoría de Investigación no experimental, la cual se caracteriza por no involucrar la manipulación deliberada de variables (Baptista y otros, 2014).

A continuación, se resume el diseño de investigación en el esquema siguiente:



Dónde:

M: estudio de muestra

X: infiltración

Y: recarga hídrica

r: relación

## 4.2. Ámbito temporal y espacial

### Temporal

Los resultados obtenidos se considerarán para la ejecución del trabajo de investigación propuesto, enmarcado dentro del periodo 2023.

### Espacial

El estudio realizado se encuentra en el sector Rontoccocha, en las comunidades campesinas de Micaela Bastidas y Atumpata, del distrito y provincia de Abancay, región Apurímac, dentro de las siguientes coordenadas geográficas:

13°40'40'' a 13°42'30'' Latitud Sur

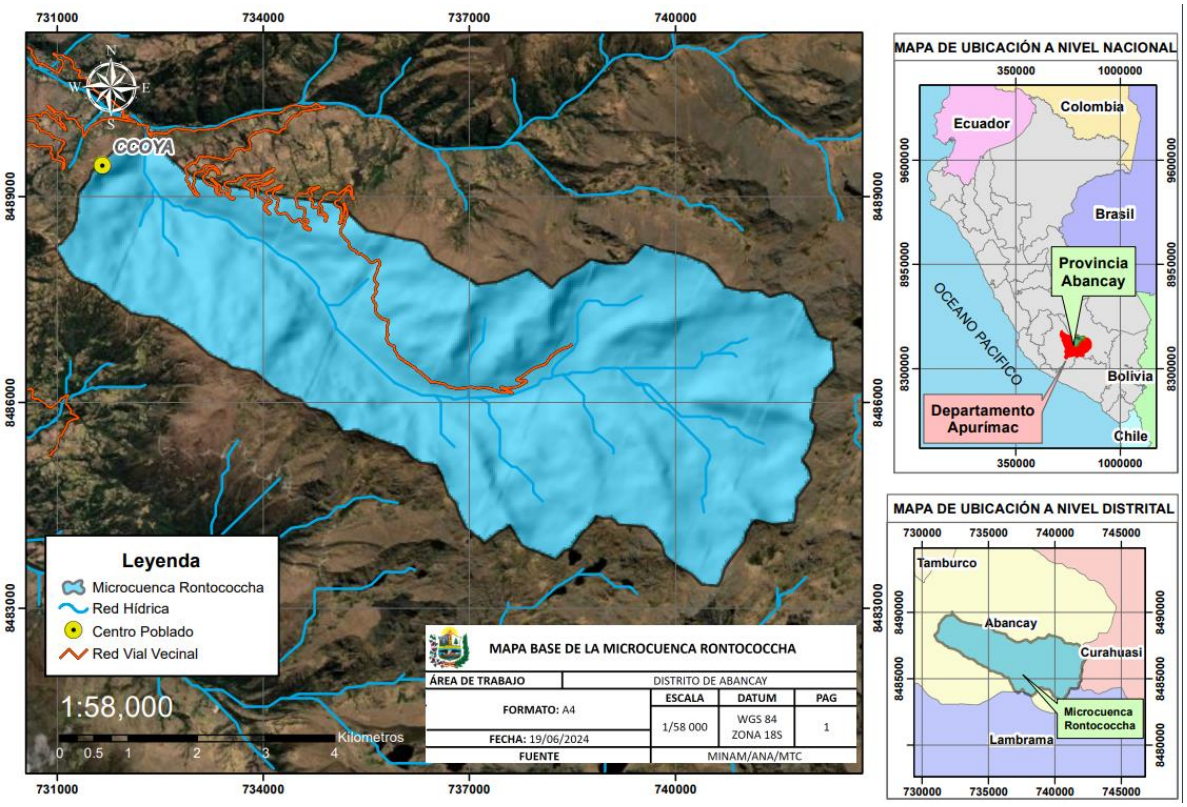
72°45'30'' a 72°48'30'' Longitud Oeste

Coordenadas UTM: entre E 738,000 – E 742,500 y N 8'487.800

Altitudinalmente se encuentra entre los 4050 y 4675 msnm.

**Figura 7**

*Sector Rontococcha*




**Nota.** La figura muestra el área de estudio.

## 4.3. Población y muestra

### 4.3.1. Población

Universo: puntos de pruebas de infiltración en los Bofedales de Rontoccocha pertenecientes al distrito y provincia de Abancay de la región Apurímac

Población 120 puntos.

### 4.3.2. Muestra

En los diversos puntos de los Bofedales de la cuenca se determinó la capacidad de infiltración utilizando el infiltrómetro de doble anillo en un total de 30 puntos específicos.

### 4.3.3. Muestreo

**Reconocimiento del entorno y ubicación del punto de monitoreo**

Se realizó una exhaustiva observación con el propósito de detectar la presencia de residuos, vegetación acuática, actividades humanas y cualquier posible influencia de la

presencia de animales, así como otros factores que pudieran alterar las características naturales del entorno. Además, se tomaron nota de las coordenadas de ubicación del punto de monitoreo para un seguimiento detallado.

**Acondicionamiento**. Se preparan los instrumentos necesarios para las tomas de muestras como el infiltrómetro de doble anillo, libretas de campo y otros.

Se llevaron a cabo las labores de toma de muestras de agua, incluyendo su preservación, etiquetado, rotulado y transporte. Se siguieron los procedimientos correspondientes, como la colocación de la indumentaria adecuada antes del inicio de la toma de muestras. El estudio se enfocó en los Bofedales altoandinos de la cuenca alta de Puruchaca y Rontoccocha, ubicados en el distrito y provincia de Abancay, en la región de Apurímac.

## 4.4. Instrumentos

### 4.4.1. Técnicas

Para la recolección de los datos, se emplearon las siguientes técnicas:

**Método del infiltrómetro de doble anillo.** Los anillos de infiltración se emplean para realizar pruebas destinadas a determinar la permeabilidad del suelo, imitando el proceso natural de infiltración del agua en el suelo. En este método, se colocan en el suelo dos anillos concéntricos, siendo uno de mayor diámetro que el otro. Ambos anillos se llenan con agua y se registra la velocidad a la que desciende el nivel del agua en el anillo interior. El objetivo de este procedimiento es asegurar que el flujo de agua en el suelo sea predominantemente vertical. La infiltración en el anillo exterior ayuda a controlar el flujo lateral del agua que se infiltra a través del anillo interior, lo que contribuye a minimizar cualquier distorsión en los datos recopilados (Delgadillo & Pérez, 2016).

Esta metodología tiene el siguiente procedimiento:

**Trazabilidad previa**. Es esencial contar con una trazabilidad previa de diversas características del sitio de la prueba para garantizar la precisión y relevancia de los resultados obtenidos. Esto implica disponer de información detallada sobre la ubicación

exacta de la parcela en la zona, documentada mediante un croquis preciso. Además, es crucial registrar las características de la superficie del suelo, como su estado de arado, la presencia de vegetación, grietas y el nivel de humedad. También se deben considerar cualquier práctica cultural reciente realizada en el área. Esta recopilación exhaustiva de datos asegura que se tomen en cuenta todas las variables relevantes que podrían influir en los resultados de las pruebas de infiltración.

**Previsiones para la prueba**. Antes de comenzar las pruebas de infiltración, es esencial seleccionar cuidadosamente el lugar, registrar la ubicación precisa del sitio de la prueba, evaluar las características del suelo y monitorear las condiciones climáticas. Se debe elegir el equipo adecuado, calibrarlo y verificar su funcionamiento antes de su uso. Además, se debe establecer un protocolo claro para la realización de la prueba, que incluya el método de aplicación del agua, la duración de la prueba y la frecuencia de muestreo. La seguridad es prioritaria durante todo el proceso, y se deben seguir medidas adecuadas para garantizar un entorno seguro de trabajo. Al considerar estos aspectos, se puede garantizar la confiabilidad de los resultados y obtener datos precisos que sean útiles para la investigación o la aplicación práctica.

**Lugar de toma de muestras**. Una vez elegida la parcela para la prueba de infiltración, es crucial identificar cuidadosamente sitios representativos en el área para la toma de muestras. Se recomienda realizar al menos dos pruebas de infiltración simultáneamente, aunque lo óptimo sería realizar tres, distribuidas en la cabecera, medio y pie de la parcela. La determinación del número de pruebas simultáneas se basará en varios factores, como la distancia al punto de suministro de agua, la disponibilidad de personal, el nivel de precisión requerido, la representatividad de la prueba, el tiempo disponible y el costo asociado.

**Provisión de agua**. La disponibilidad de agua es crucial para el éxito de la prueba, por lo que es importante asegurarse de contar con una cantidad suficiente de agua para completarla con éxito. Si no hay suficiente agua en el lugar de la prueba, es esencial

identificar de antemano una fuente cercana de suministro de agua para garantizar el desarrollo adecuado de la prueba.

**Otros cuidados**. Es fundamental realizar una limpieza minuciosa del área de prueba para evitar alterar las condiciones iniciales del suelo. Esto implica retirar solo el material vegetal grueso o la basura presente, evitando en la medida de lo posible cualquier daño a la superficie del suelo.

**Instalación de los anillos**. Se colocan en el suelo de manera concéntrica, utilizando el método de los anillos concéntricos, asegurando que se inserten al menos a una profundidad de 10 cm. Este procedimiento es fundamental para el éxito de la prueba, dado que una inserción incorrecta podría provocar la filtración del agua, lo que requeriría repetir la instalación y reiniciar la prueba desde el principio.

**Instalación del dispositivo de aforo**. Una vez que los anillos están en su lugar, se procede con la instalación del dispositivo de medición seleccionado. Este dispositivo permitirá determinar y registrar la tasa de infiltración del suelo durante el transcurso de la prueba.

**Vertido de agua una vez instalados los dos anillos**. Siguiendo el método concéntrico, una vez que el cronómetro o reloj está listo y la regla graduada está colocada, si es necesaria, se vierte agua en ambos compartimentos formados por la disposición concéntrica de los anillos.

**Toma de datos de campo**. La lectura es bastante sencilla, ya que solo implica registrar la altura del agua a medida que desciende, ya sea mediante el flotador y/o boya o utilizando la regla pegada al interior del anillo interno, en determinado tiempo predefinidos anteriormente.

La identificación de los puntos de muestreo utilizando el infiltrómetro de doble anillo implica seleccionar áreas representativas dentro del área de estudio donde se realizarán las mediciones de infiltración del suelo.

Los parámetros determinados incluyen la tasa de infiltración del suelo, que representa la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, así como la capacidad de infiltración, que indica la cantidad máxima de agua que el suelo puede absorber en un período determinado. Estos parámetros son esenciales para comprender el comportamiento hidrológico del suelo y para diseñar sistemas de gestión de recursos hídricos eficientes.

Para la generación de caudales se utilizó la metodología CUBHIC, el mismo que consiste en lo siguiente:

Los humedales son ecosistemas característicos de las regiones altoandinas, que albergan una diversidad de especies adaptadas a estas condiciones. Estos ecosistemas tienen la capacidad única de almacenar grandes cantidades de materia orgánica en el suelo, formando un tipo de suelo oscuro conocido como turba. En los Andes del Perú, los humedales también son llamados bofedales, y desempeñan funciones vitales como proveer pastizales para la ganadería de altura, regular el flujo hídrico y actuar como reservorios naturales de carbono, contribuyendo así al servicio de secuestro de carbono y a la mitigación del cambio climático (Delgadillo & Pérez, 2016).

En lo que respecta al beneficio de los bofedales en relación con la seguridad hídrica, se destaca su capacidad para reducir la escorrentía generada por las precipitaciones. Esto se debe a que los bofedales actúan como esponjas naturales, almacenando agua de manera significativa y mejorando así los procesos de infiltración en el suelo. Esta función de almacenamiento de agua no solo contribuye a regular el flujo de agua superficial, sino que también aumenta la disponibilidad de agua en el suelo, lo que puede ser crucial para el suministro de agua durante períodos secos y para mantener el equilibrio hídrico en los ecosistemas altoandinos. (Delgadillo & Pérez, 2016).

Datos de entrada para la metodología

a. Compilación de información básica
    - Características del suelo que afectan los procesos del contenido de humedad.

- Tipos de vegetación (conformada por una biodiversidad de especies herbáceas, costras biológicas y otros) que afectan la evapotranspiración y la escorrentía.

b. Ingresos específicos de paso de tiempo
   - Tasas de precipitación diaria
   - Datos de temperatura (máximas, mínimas y promedios diarios)

Cálculos de cuantificación de los beneficios hidrológicos en ecosistemas de humedal altoandino.

Espacio de contribución de aguas en la parte alta de la cuenca

Escorrentía superficial

Percolación

Evapotranspiración

Contenido de humedad

Manejo y protección de bofedales

Acceso de flujo superficial

Almacenamiento

Evapotranspiración

Salida de flujo

Infiltración

A continuación, se presentan las distintas etapas de cálculo centradas en el balance hídrico y los subcomponentes del mismo.

**Ecuación del balance hídrico en el área contribuyente.**

El balance hídrico en un área contribuyente se refiere a la relación entre las entradas y las salidas de agua en la cuenca. Las entradas incluyen la precipitación, el escurrimiento superficial, la infiltración en el suelo y la recarga de acuíferos. Las salidas pueden ser el escurrimiento superficial, la evaporación desde la superficie del suelo y las plantas, y la transpiración de las plantas.

Para realizar el cálculo del balance hídrico en la región de interés, podemos representar la precipitación a través de la siguiente fórmula:

$$P = Q + ET + p + \Delta R \quad (1)$$

Donde:

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

ET = evapotranspiración (mm)

p = percolación (mm)

$\Delta$R = cambio en el contenido de agua (mm)

Esta ecuación suma la precipitación registrada en todas las estaciones meteorológicas dentro de la región contribuyente para obtener la precipitación total en esa región durante el período de tiempo considerado en el cálculo del balance hídrico.

**Escorrentía.** La precipitación que no se infiltra en el suelo se convierte en escorrentía, la cual puede calcularse utilizando el método del número de curva. Este método emplea "números de curva" que representan la permeabilidad del suelo y se asignan a diferentes áreas según su vegetación, incluyendo una variedad de especies como musgos, líquenes, hierbas, costras biológicas o *biocrusts*, entre otros, así como el tipo de suelo presente en cada área.

La ecuación del número de curva se utiliza para calcular la escorrentía superficial en función de la permeabilidad del suelo y se expresa de la siguiente manera:

Si P > 0,05

$$Q = ¿ \quad (2)$$

donde:

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

$$s = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

CN = Número de Curva

**Percolación.** En relación con la percolación, se considera que la humedad del suelo actúa como un reservorio que puede aumentar debido a la precipitación e infiltración, y disminuir debido a la evapotranspiración y la filtración hacia las aguas subterráneas. La humedad del suelo se encuentra limitada por dos niveles críticos: la capacidad de campo y el punto de marchitez. Estos valores suelen expresarse como porcentajes y se multiplican por la profundidad de la capa del suelo para obtener un valor en milímetros. En este contexto, la profundidad de la capa de suelo se fija en 150 mm para representar la zona de la raíz de las plantas. Durante cada intervalo de tiempo en el balance hídrico, cualquier exceso de agua en el reservorio del suelo por encima de la capacidad de campo se considera como percolación.

$$p = max \quad (4)$$

donde:

fc = capacidad de campo (mm)

Rt–1 = contenido de humedad del paso de tiempo previo (mm)

P = precipitación (mm)

Q= escorrentía (mm)

**Evaporación y evapotranspiración.** La evapotranspiración se estima inicialmente calculando la evapotranspiración potencial (E0), que representa la cantidad máxima de evaporación que el aire podría soportar. Posteriormente, esta cantidad se ajusta multiplicándola por un coeficiente (r) que varía en función del índice de área foliar (*Leaf Area Index* - LAI), lo que permite determinar la cantidad de evapotranspiración real que ocurre en el área en consideración que tiene lugar.

Si, LAI ≥ 3, r = 1.

$$ET = min\left[E_0 * r, 0,8\left(R_{t-1} + P - Q - p - \wp\right)\right] \quad (5)$$

El método de Priestly-Taylor se puede escribir de la siguiente manera:

$$E_0 = \frac{\alpha_{pet}\Delta}{\lambda(\Delta+\gamma)}\left(H_{net} - G\right) \quad (6)$$

donde:

$\alpha_{pet}$ = coeficiente (1,26)

Δ = pendiente de la curva de presión de saturación -temperatura (kPA/°C)

$$\Delta = \frac{4098 e_0}{\square} \quad (7)$$

T = temperatura media diaria en °C

$e_0$= presión de vapor de saturación (kPA)

$$e_0 = \left(\frac{16.78T - 116.9}{T - 237.3}\right) \quad (8)$$

λ = calor latente de vaporización (MJ/kg)

$$\lambda = 2.501 - 0.002361T \quad (9)$$

γ = constante psicrométrica (kPA/°C)

$$\gamma = \frac{0.001013 P_a}{0.622\lambda} \quad (10)$$

$P_a$ = presión atmosférica (kPa)

$$Pa = 101 - 0.01152 EL + 0.544 * 10 \quad (11)$$

EL = elevación (m)

$H_{net}$ = radiación neta diaria (MJ/m²d)

G = La densidad de flujo de calor al suelo (en MJ/m²día) se considera mínima y, para los propósitos de este documento, puede asumirse como 0.

Las ecuaciones que describen la radiación pueden ser complejas; sin embargo, para los propósitos de este documento, la radiación será representada mediante ecuaciones del modelo SWAT.

.

$$H_{net} = (1-\alpha)H_{sw} + H_{lw} \quad (12)$$

donde:

α = albedo (fracción adimensional 0-1)

$H_{sw}$ = radiación entrante de onda corta

$H_{lw}$ = radiación de onda larga

La radiación de onda larga, según se aplica en las ecuaciones del modelo SWAT, depende tanto de la temperatura como de la cobertura de nubes (Gao, F. et al 2005).

$$H_{lw} = \frac{c}{0.8}x \quad (13)$$

donde:

c = La fracción de cobertura de nubes, expresada como una unidad adimensional en el rango de 0,3 a 0,8, tiende a ser menor en presencia de una cobertura densa de nubes y mayor cuando no hay nubes presentes. En ausencia de datos específicos sobre la cobertura de nubes, se puede utilizar un valor promedio de 0,5.

La radiación de onda corta, tal como se emplea en las ecuaciones del modelo SWAT, varía en función de la latitud, el día del año y la cobertura de nubes.

$$H_{sw} = \frac{c}{0.8}(a\delta^2 + b\delta + d) \quad (14)$$

$a = 7.6\times10^{-7}\,\phi^4 + 0.00607\phi^2 - 14.639$

$b = -3.83\times10^{-5}\,\phi^3 + 0.805\phi$

$d = -0.0042\phi^2 + 29.913$

ϕ = latitud en grados

δ = declinación solar, donde

$$H_{sw} = 0.409 sen\left(\frac{2\pi(día - 82)}{365}\right) \quad (15)$$

**Ecuaciones del balance hídrico en la restauración y protección de humedales.** El cambio en la cantidad de agua almacenada en un bofedal se puede calcular considerando tanto las entradas como las salidas de agua. El volumen de agua en el humedal aumenta debido a la escorrentía y la precipitación, mientras que disminuye debido a la evaporación, la infiltración y las pérdidas hacia el acuífero subterráneo desde el fondo del bofedal. Por consiguiente, el cambio neto en el almacenamiento de agua del humedal se determina restando las salidas totales de agua de las entradas totales de agua.

$$\Delta W = W_{\square} + P - W_{E - W_S - W_{out}} \quad (16)$$

donde:

ΔW = cambio en el almacenamiento de agua del humedal (mm)

$W_{in}$ = ingreso (mm) de escorrentía

P = precipitación (mm) sobre la superficie del humedal

$W_E$= evapotranspiración (mm) del humedal

$W_s$= filtración (mm) del humedal

$W_{out}$ = salida (mm) del humedal

Para determinar la entrada al humedal, se utiliza la escorrentía (Q) proveniente del área contribuyente. Se calcula multiplicando la lámina de escorrentía de la región contribuyente por el área de esa región en hectáreas y un factor de conversión (10 000), y luego dividiendo el resultado por el área del humedal en metros cuadrados.

donde:

Q = escorrentía (mm)

$A_c$ = área de contribución (ha)

$A_w$ = área del humedal ($m^2$)

En los humedales, la velocidad de infiltración se ve influenciada por la conductividad hidráulica saturada del suelo, lo que puede ocasionar la retención de agua en ciertas áreas. Esto significa que los suelos de los humedales tienen la capacidad de absorber y filtrar el agua de manera lenta, lo que contribuye al mantenimiento de estos ecosistemas. La conductividad hidráulica saturada del suelo, que indica la capacidad del suelo para permitir el flujo de agua cuando está completamente saturado, desempeña un papel crucial en la hidrología y el funcionamiento de los humedales. La tasa de filtración en los humedales se calcula mediante la siguiente función:

$$W_s = max. \quad (17)$$

El cálculo de la evapotranspiración en los humedales sigue un enfoque similar al utilizado en la región contribuyente, pero con algunas adaptaciones:

- El albedo del bofedal puede ser distinto al albedo utilizado para la región contribuyente. En este escenario, podemos asumir que el albedo del humedal es de 0,20.

- El coeficiente del índice de área foliar (r) en el humedal siempre se considera igual a 1 y puede omitirse en los cálculos.

- El punto de marchitez del humedal (WP) puede diferir del punto de marchitez utilizado para la región contribuyente.

La función de evapotranspiración para el humedal se define de la siguiente manera:

$$W_E = min(E_0, 0,8(W_{t-1} + W_{\square} + P - W_s - \wp)) \quad (18)$$

El excedente de agua que sobrepase la capacidad máxima de almacenamiento del humedal se transforma en un flujo de salida, el cual puede ser calculado mediante la siguiente función:

$$W_{out} = max(0, W_{t-1} + W_{\square} + P - W_E - W_S - W_{max}) \quad (19)$$

donde:

$W_{max}$= profundidad máxima del almacenamiento de humedales (mm)

$W_{max}$ = 1000D + 0,5sd

D= máxima profundidad de agua del humedal (m)

sd = profundidad de la capa del suelo (mm)

El análisis del balance hídrico de volumen en el humedal sigue un enfoque similar al utilizado para el suelo, considerando múltiples pasos de tiempo. Se calcula la diferencia en el volumen de agua entre dos momentos consecutivos, representada por la fórmula $\Delta V=V_t-V_{t-1}$, donde t denota el paso de tiempo. De esta manera, el balance hídrico se puede reconfigurar para estimar el volumen de agua del humedal en un paso de tiempo diario.

$$W_t = W_{t-1} + W_{\square} + P - W_E - W_s - W_{out} \quad (20)$$

donde:

$W_t$ = El cálculo del nivel de agua del humedal en el tiempo (t), medido en milímetros, puede determinarse mediante la integración de los distintos aspectos del balance hídrico del humedal. Dado que algunos aspectos están interrelacionados, se recomienda seguir el siguiente orden para calcular el balance hídrico:

1. Determinar los ingresos.
2. Calcular la tasa de infiltración.
3. Evaluar la tasa de evaporación.
4. Estimar las salidas de agua.
5. Actualizar el nivel de almacenamiento del bofedal.

### 4.4.2. Instrumentos

Para la recolección de los datos se utilizaron fichas de observación de campo.

## 4.5. Procedimientos

El procesamiento de los datos de la información obtenida se efectuó aplicando la ecuación de Kostiakov mediante el programa Excel, lo cual también permitió una evaluación estadística obtenida en campo mediante el análisis de varianza (ANOVA). Se presentaron

los datos en un cuadro estadístico con el respectivo gráfico de barras para ser interpretados y analizados (Ochoa y otros, 2022).

Finalmente, se utilizó la metodología CUBHIC 2.0; dicha metodología realiza una cuantificación de beneficios potenciales de esta manera se pretende estimar la capacidad de recarga hídrica de los bofedales del sector Rontoccocha (Ochoa y otros, 2022).

### 4.6. Consideraciones éticas

Este proyecto es recopilado mediante una profunda búsqueda de información y redactado de manera minuciosa y detallada en los aspectos más importantes a considerar, los cuales se detallan a continuación.

Respeto a la cultura local; en el trabajo de investigación se reconoce y respeta la cultura, las creencias y las prácticas de las comunidades aledañas al área de estudio.

Equidad y justicia; en la presente investigación se garantiza la equidad y justicia en todas sus etapas.

Integridad científica; el estudio se realizó de manera profesional, siguiendo los más altos estándares de integridad científica donde se evitó el plagio o mala conducta académica, se mantiene la transparencia en todas las actividades de investigación.

Divulgación de resultados; se comparte los resultados de manera clara, precisa y accesibles tanto como la comunidad universitaria y público en general.

# V. Resultados y discusión

## 5.1. Resultados

UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS DEL ESTUDIO

La zona de estudio se ubica en el sector Rontoccocha, provincia de Abancay, región Apurímac, tal cual lo manifiesta la siguiente tabla:

**Tabla 4**

*Ubicación de áreas de muestreo*

| N° Muestra | Coordenadas | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Norte | Este | Altitud (msnm) | Grupo de altitud |
| M1 | 8486688 | 738642 | 4169 | Altitud alta |
| M2 | 8487555 | 739416 | 3960 | Altitud baja |
| M3 | 8487252 | 739098 | 4059 | Altitud media |
| M4 | 8487330 | 738575 | 4008 | Altitud media |
| M5 | 8486668 | 738534 | 4082 | Altitud media |
| M6 | 8486532 | 740328 | 3975 | Altitud baja |
| M7 | 8486664 | 738993 | 3981 | Altitud baja |
| M8 | 8485367 | 740695 | 4083 | Altitud alta |
| M9 | 8485640 | 741060 | 4122 | Altitud alta |
| M10 | 8485596 | 741452 | 4055 | Altitud media |
| M11 | 8484806 | 740073 | 3970 | Altitud baja |
| M12 | 8483894 | 740053 | 3992 | Altitud baja |
| M13 | 8485027 | 740095 | 4005 | Altitud baja |
| M14 | 8485060 | 740744 | 4121 | Altitud alta |
| M15 | 8489427 | 741081 | 4135 | Altitud alta |
| M16 | 8486090 | 740951 | 4054 | Altitud media |
| M17 | 8491525 | 737826 | 4121 | Altitud alta |
| M18 | 8487236 | 741131 | 3958 | Altitud baja |
| M19 | 8487315 | 736512 | 4072 | Altitud media |
| M20 | 8490250 | 740344 | 4071 | Altitud media |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| M21 | 8489368 | 738945 | 4167 | Altitud alta |
| M22 | 8486971 | 736918 | 3991 | Altitud baja |
| M23 | 8488669 | 736510 | 3989 | Altitud baja |
| M24 | 8491799 | 740327 | 4116 | Altitud alta |
| M25 | 8486117 | 741345 | 3967 | Altitud baja |
| M26 | 8490578 | 736042 | 4012 | Altitud baja |
| M27 | 8490014 | 736388 | 3995 | Altitud baja |
| M28 | 8490440 | 737184 | 4091 | Altitud media |
| M29 | 8490974 | 737085 | 4054 | Altitud media |
| M30 | 8487508 | 739224 | 3976 | Altitud baja |

**Nota.** Ubicación de áreas de recarga acuífera del sector Rontoccocha del distrito Abancay – Apurímac.

La tabla proporciona datos sobre la ubicación de las áreas de recarga acuífera en el sector Rontoccocha, ubicada en el distrito de Abancay, Apurímac. Los datos incluyen la coordenada norte, la coordenada este y la altitud en metros sobre el nivel del mar (msnm) para 30 puntos de referencia identificados como M1 a M30.

Por ejemplo, para el punto M1, la coordenada norte es 8486688, la coordenada este es 738642, y la altitud es 4169 msnm. Estos datos se repiten para cada uno de los 30 puntos enumerados.

Esta información es valiosa para comprender la distribución geográfica de las áreas de recarga acuífera en el sector, lo que puede ser útil para la gestión y conservación de los recursos hídricos en la región.

También se ha realizado las divisiones por rangos de altitud, donde:

**Grupo de altitud baja:** este grupo comprende muestras con altitudes que van desde 3958 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta 4012 msnm. Las ubicaciones dentro de este rango se consideran de altitud relativamente baja en comparación con las otras muestras.

**Grupo de altitud media:** este grupo abarca muestras con altitudes que van desde 4013 msnm hasta 4083 msnm. Las ubicaciones dentro de este rango se consideran de altitud intermedia en relación con las otras muestras.

**Grupo de altitud alta:** este grupo incluye muestras con altitudes que van desde 4084 msnm hasta 4169 msnm. Las ubicaciones dentro de este rango se consideran de altitud relativamente alta en comparación con las otras muestras.

***Estos grupos proporcionan una manera de categorizar las muestras según su altitud, lo que puede ser útil para analizar cómo ciertas variables o fenómenos pueden variar con la altitud en el área de estudio.***

**Descripción, análisis de indicadores de muestras.** Durante el desarrollo de la investigación, se analizaron un total de 30 muestras con el propósito de investigar el fenómeno de infiltración en la región de recarga hídrica del sector Rontoccocha, la cual forma parte de la Unidad Hidrográfica alto Mariño. A continuación, se presenta un resumen exhaustivo de los resultados obtenidos en el campo durante la prueba de infiltración, así como su disposición sistemática.

**Tabla 5**

*Datos de la muestra M01*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 1 | 15.5 | 15 | 0.5 | 0.5 | 30.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M1 | 2 | 15 | 14.8 | 0.2 | 0.7 | 21.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M1 | 4 | 14.8 | 14.6 | 0.2 | 0.9 | 13.50 | 0.212 | 0.0048 |
| M1 | 6 | 14.6 | 14.3 | 0.3 | 1.2 | 12.00 | 0.318 | 0.0073 |
| M1 | 8 | 14.3 | 14.2 | 0.1 | 1.3 | 9.75 | 0.106 | 0.0024 |
| M1 | 10 | 14.2 | 14.1 | 0.1 | 1.4 | 8.40 | 0.106 | 0.0024 |
| M1 | 15 | 14.1 | 13.9 | 0.2 | 1.6 | 6.40 | 0.085 | 0.0019 |
| M1 | 20 | 13.9 | 13.6 | 0.3 | 1.9 | 5.70 | 0.127 | 0.0029 |
| M1 | 30 | 13.6 | 13.2 | 0.4 | 2.3 | 4.60 | 0.085 | 0.0019 |
| M1 | 40 | 13.2 | 12.6 | 0.6 | 2.9 | 4.35 | 0.127 | 0.0029 |
| M1 | 55 | 12.6 | 12.3 | 0.3 | 3.2 | 3.49 | 0.042 | 0.0010 |
| M1 | 75 | 12.3 | 11.7 | 0.6 | 3.8 | 3.04 | 0.064 | 0.0015 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 95 | 11.7 | 11.2 | 0.5 | 4.3 | 2.72 | 0.053 | 0.0012 |
| M1 | 120 | 11.2 | 10.9 | 0.3 | 4.6 | 2.30 | 0.025 | 0.0006 |
| Promedio | | | | | | | 0.2025 | 0.0046 |

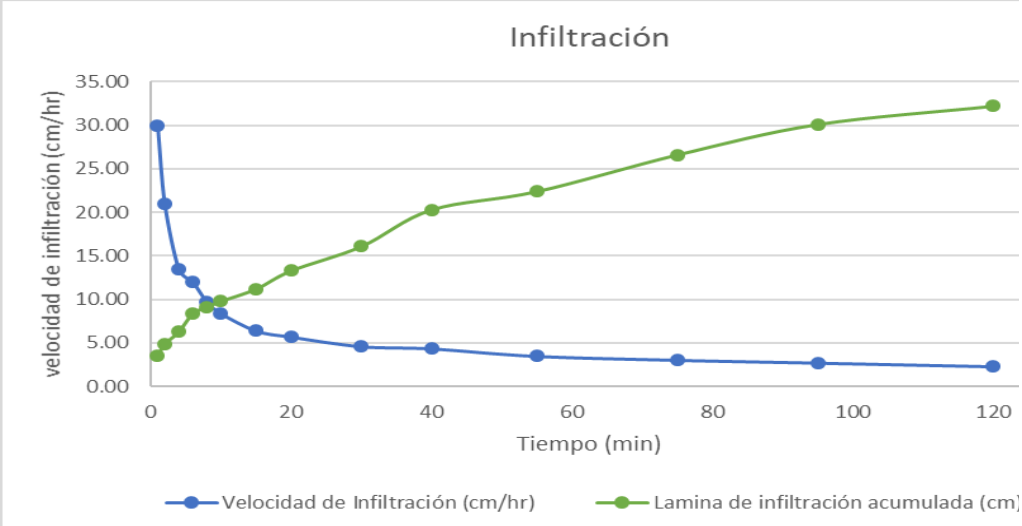
**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M1

En la tabla anterior se detalla el proceso de crecimiento de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado (T0) de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, la medición del nivel de agua se determina por la diferencia entre estos dos anillos. El nivel mínimo de infiltración de agua registrado es de 0,1 cm, mientras que el máximo alcanza los 0,6 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M1 muestran también la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que representa la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, disminuye gradualmente a medida que aumenta el tiempo acumulado, lo que indica una disminución en la capacidad del suelo para absorber agua a lo largo del tiempo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también disminuye con el tiempo acumulado. El promedio de la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica para la muestra M1 es de 0,202 cm/hr y 0,005 cm/hr respectivamente. Esto sugiere que, en promedio, el suelo de la muestra M1 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que puede ser útil para determinar su idoneidad para diversas actividades, como la agricultura o la gestión de recursos hídricos

**Figura 8**

*Resultados de la muestra M01*




**Nota.** Se muestra figura de los resultados

Se detectó una velocidad mínima de infiltración de 2,30 cm/h y una velocidad máxima de 30,00 cm/h. Además, se registró un volumen máximo de agua infiltrada acumulada de 4600 $cm^3$.

**Tabla 6**

*Datos de la muestra M02*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M2 | 1 | 19 | 16.8 | 2.2 | 2.2 | 132.00 | 4.669 | 0.1066 |
| M2 | 2 | 16.8 | 15.8 | 1 | 3.2 | 96.00 | 2.122 | 0.0484 |
| M2 | 4 | 15.8 | 13.8 | 2 | 5.2 | 78.00 | 2.122 | 0.0484 |
| M2 | 6 | 13.8 | 12 | 1.8 | 7 | 70.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M2 | 8 | 12 | 10.6 | 1.4 | 8.4 | 63.00 | 1.486 | 0.0339 |
| M2 | 10 | 10.6 | 9.2 | 1.4 | 9.8 | 58.80 | 1.486 | 0.0339 |
| M2 | 15 | 9.2 | 6.6 | 2.6 | 12.4 | 49.60 | 1.104 | 0.0252 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M2 | 20 | 19.3 | 16.6 | 2.7 | 15.1 | 45.30 | 1.146 | 0.0262 |
| M2 | 30 | 16.6 | 10.9 | 5.7 | 20.8 | 41.60 | 1.210 | 0.0276 |
| M2 | 40 | 10.9 | 7 | 3.9 | 24.7 | 37.05 | 0.828 | 0.0189 |
| M2 | 55 | 18 | 10.1 | 7.9 | 32.6 | 35.56 | 1.118 | 0.0255 |
| M2 | 75 | 10.1 | 4.2 | 5.9 | 38.5 | 30.80 | 0.626 | 0.0143 |
| M2 | 95 | 18 | 10.8 | 7.2 | 45.7 | 28.86 | 0.764 | 0.0174 |
| M2 | 120 | 10.8 | 3.9 | 6.9 | 52.6 | 26.30 | 0.586 | 0.0134 |
| Promedio | | | | | | | 1.5126 | 0.0345 |

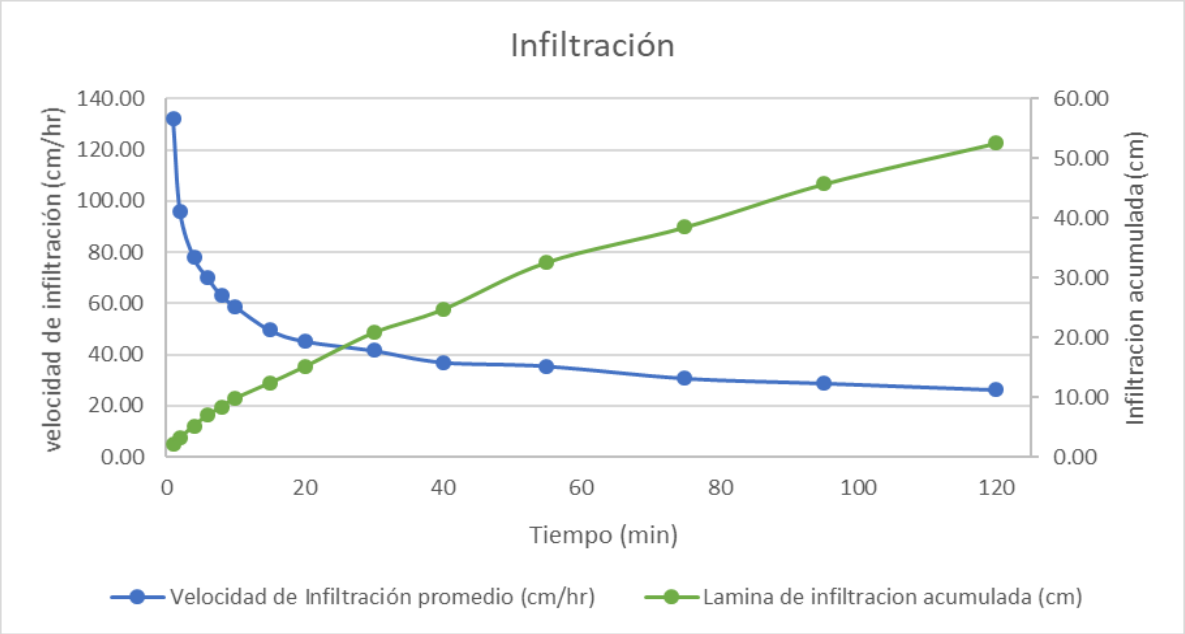
**Nota.** Se muestra Resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M1

En la tabla previa se detalla el proceso de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas durante un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se registra a partir de la diferencia entre estos. Durante las mediciones, se observaron niveles de infiltración de agua que oscilaron entre un mínimo de 1,0 cm y un máximo de 7,9 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M2 muestran que la tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, disminuye a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. Esto sugiere una capacidad decreciente del suelo para absorber agua con el tiempo. Del mismo modo, la conductividad hidráulica, que representa la habilidad del suelo para transportar agua, también disminuye a medida que avanza el tiempo. El promedio de la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica para la muestra M2 es de 1,5126 cm/hr y 0,0345 cm/hr, respectivamente. Esto implica que, en promedio, el suelo de la muestra M2 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que puede influir en su idoneidad para diversas aplicaciones agrícolas o de gestión de recursos hídricos.

**Figura 9**

*Resultado de la muestra M02*




**Nota.** Se muestra figura de la muestra 02

Se detectó una velocidad mínima de infiltración de 26,30 cm/h y una máxima de 132,00 cm/h. Además, se registró un volumen máximo de agua infiltrada acumulada de 52,60 $cm^3$.

**Tabla 7**

*Datos de la muestra M03*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M3 | 1 | 15.5 | 15.1 | 0.4 | 0.4 | 24.00 | 0.849 | 0.0194 |
| M3 | 2 | 15.1 | 14.2 | 0.9 | 1.3 | 39.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M3 | 4 | 14.2 | 13.1 | 1.1 | 2.4 | 36.00 | 1.167 | 0.0266 |
| M3 | 6 | 13.1 | 12.4 | 0.7 | 3.1 | 31.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M3 | 8 | 12.4 | 11.8 | 0.6 | 3.7 | 27.75 | 0.637 | 0.0145 |
| M3 | 10 | 11.8 | 11.2 | 0.6 | 4.3 | 25.80 | 0.637 | 0.0145 |
| M3 | 15 | 11.2 | 9.6 | 1.6 | 5.9 | 23.60 | 0.679 | 0.0155 |
| M3 | 20 | 9.6 | 8 | 1.6 | 7.5 | 22.50 | 0.679 | 0.0155 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M3 | 30 | 8 | 5.6 | 2.4 | 9.9 | 19.80 | 0.509 | 0.0116 |
| M3 | 40 | 15.5 | 12.2 | 3.3 | 13.2 | 19.80 | 0.700 | 0.0160 |
| M3 | 55 | 12.2 | 8 | 4.2 | 17.4 | 18.98 | 0.594 | 0.0136 |
| M3 | 75 | 15.5 | 10 | 5.5 | 22.9 | 18.32 | 0.584 | 0.0133 |
| M3 | 95 | 10 | 5.5 | 4.5 | 27.4 | 17.31 | 0.478 | 0.0109 |
| M3 | 120 | 10 | 5.5 | 4.5 | 31.9 | 15.95 | 0.382 | 0.0087 |
| Promedio | | | | | | | 0.7534 | 0.0172 |

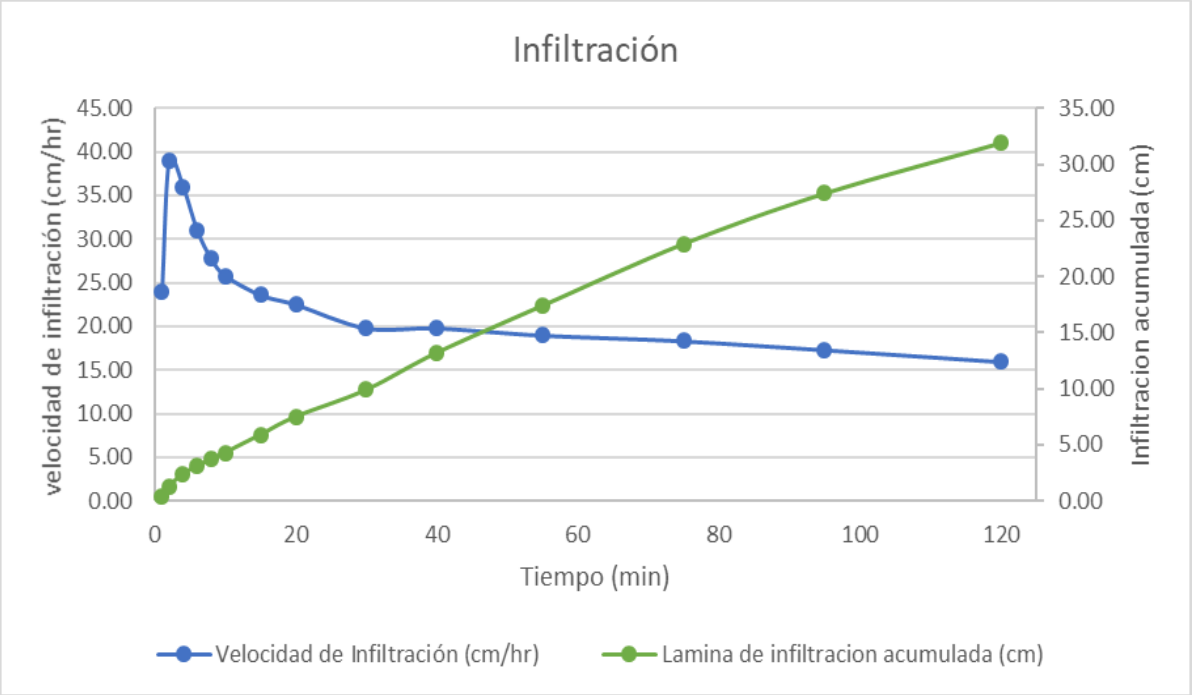
**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M03

La tabla anterior brinda un exhaustivo seguimiento del desarrollo de la muestra, contemplando un total de 14 mediciones realizadas a lo largo de un intervalo de 120 minutos. Dado que el dispositivo emplea dos anillos, la medición del nivel de agua se lleva a cabo considerando la diferencia entre estos. Durante las mediciones, se observaron niveles de infiltración de agua que variaron entre un mínimo de 0,4 cm y un máximo de 5,5 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M3 muestran una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, varía a lo largo del tiempo, con una tendencia general a disminuir. Esto sugiere que el suelo puede volverse menos permeable con el tiempo. La conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta una variación, aunque en general tiende a disminuir. El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M3 es de 0,7534 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0172 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M3 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que puede influir en su idoneidad para diferentes usos, como la agricultura o la gestión de recursos hídricos.

**Figura 10**

*Resultados de la muestra M03*




**Nota.** Se muestra figura de la muestra 03

Se registró una velocidad mínima de infiltración de 15,95 cm/h y una velocidad máxima de 39,00 cm/h. Además, se observó que la cantidad máxima de agua infiltrada acumulada alcanzó los 31,90 $cm^3$.

**Tabla 8**

*Datos de la muestra M04*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M4 | 1 | 15.7 | 14.3 | 1.4 | 1.4 | 84.00 | 2.971 | 0.0678 |
| M4 | 2 | 14.3 | 13.8 | 0.5 | 1.9 | 57.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M4 | 4 | 13.8 | 12.9 | 0.9 | 2.8 | 42.00 | 0.955 | 0.0218 |
| M4 | 6 | 12.9 | 11.8 | 1.1 | 3.9 | 39.00 | 1.167 | 0.0266 |
| M4 | 8 | 11.8 | 11 | 0.8 | 4.7 | 35.25 | 0.849 | 0.0194 |
| M4 | 10 | 11 | 10.1 | 0.9 | 5.6 | 33.60 | 0.955 | 0.0218 |
| M4 | 15 | 10.1 | 8.2 | 1.9 | 7.5 | 30.00 | 0.807 | 0.0184 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M4 | 20 | 8.2 | 6.5 | 1.7 | 9.2 | 27.60 | 0.722 | 0.0165 |
| M4 | 30 | 6.5 | 4 | 2.5 | 11.7 | 23.40 | 0.531 | 0.0121 |
| M4 | 40 | 15.2 | 11.5 | 3.7 | 15.4 | 23.10 | 0.785 | 0.0179 |
| M4 | 55 | 11.5 | 7.5 | 4 | 19.4 | 21.16 | 0.566 | 0.0129 |
| M4 | 75 | 7.5 | 2.9 | 4.6 | 24 | 19.20 | 0.488 | 0.0111 |
| M4 | 95 | 13.2 | 7.7 | 5.5 | 29.5 | 18.63 | 0.584 | 0.0133 |
| M4 | 120 | 7.7 | 7.4 | 0.3 | 29.8 | 14.90 | 0.025 | 0.0006 |
| Promedio | | | | | | | 0.8904 | 0.0203 |

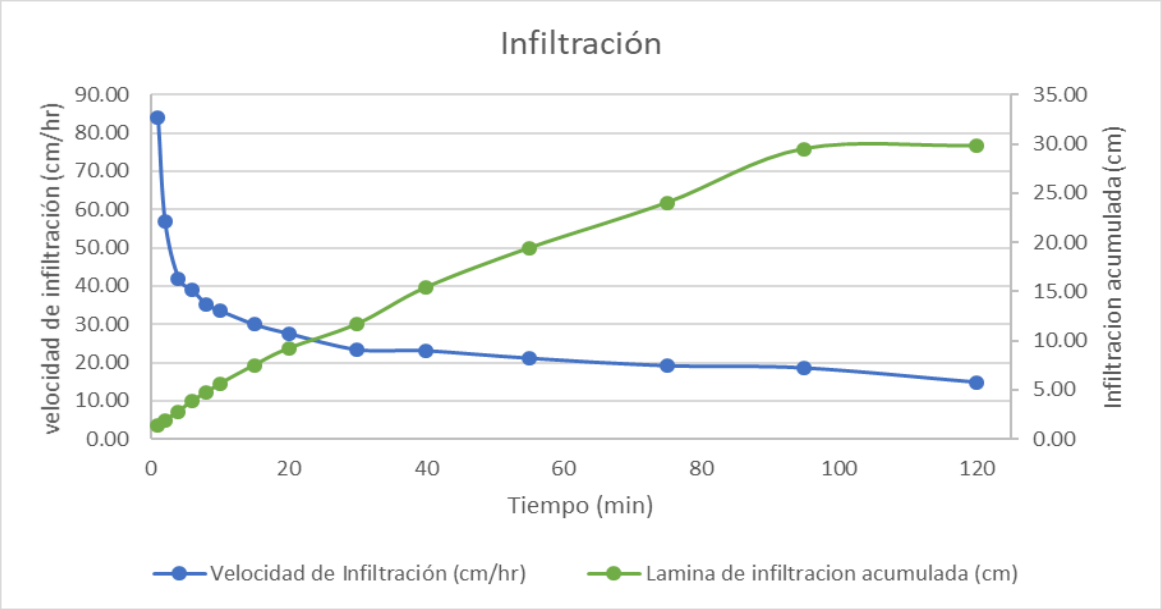
**Nota.** Se muestra Resultados y análisis del ensayo de la muestra M04

La tabla anterior proporciona un detallado seguimiento del desarrollo de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un lapso acumulado de 120 minutos. Dado que el instrumento utilizado cuenta con dos anillos, se utiliza la diferencia entre estos para medir el nivel de agua. Durante las mediciones, se observaron niveles de infiltración de agua que variaron desde un mínimo de 0,3 cm hasta un máximo de 5,5 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M4 revelan una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones a lo largo del tiempo, con una tendencia general a disminuir. Esto sugiere que el suelo puede experimentar cambios en su permeabilidad con el tiempo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que representa la capacidad del suelo para transportar agua, también exhibe una variación, aunque en general tiende a disminuir. El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M4 es de 0,8904 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0203 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M4 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que puede influir en su idoneidad para diferentes aplicaciones, como la agricultura o la gestión de recursos hídricos

**Figura 11**

*Resultados de la muestra M04*




**Nota.** Se muestra resultados de la muestra M04

Se visualizó una velocidad mínima de infiltración de 14,90 cm/h y una velocidad máxima de 84,00 cm/h. Además, se observó que la cantidad máxima de agua infiltrada acumulada alcanzó los 29,80 $cm^3$.

**Tabla 9**

*Datos de la muestra M05*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M5 | 1 | 16.5 | 16 | 0.5 | 0.5 | 30.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M5 | 2 | 16 | 15.1 | 0.9 | 1.4 | 42.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M5 | 4 | 15.1 | 14.1 | 1 | 2.4 | 36.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M5 | 6 | 14.1 | 13 | 1.1 | 3.5 | 35.00 | 1.167 | 0.0266 |
| M5 | 8 | 13 | 12 | 1 | 4.5 | 33.75 | 1.061 | 0.0242 |
| M5 | 10 | 12 | 11.1 | 0.9 | 5.4 | 32.40 | 0.955 | 0.0218 |
| M5 | 15 | 11.1 | 9 | 2.1 | 7.5 | 30.00 | 0.891 | 0.0203 |
| M5 | 20 | 9 | 6.8 | 2.2 | 9.7 | 29.10 | 0.934 | 0.0213 |
| M5 | 30 | 6.8 | 3.9 | 2.9 | 12.6 | 25.20 | 0.615 | 0.0140 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M5 | 40 | 16.3 | 12.6 | 3.7 | 16.3 | 24.45 | 0.785 | 0.0179 |
| M5 | 55 | 12.6 | 9 | 3.6 | 19.9 | 21.71 | 0.509 | 0.0116 |
| M5 | 75 | 9 | 2.8 | 6.2 | 26.1 | 20.88 | 0.658 | 0.0150 |
| M5 | 95 | 16.2 | 10.8 | 5.4 | 31.5 | 19.89 | 0.573 | 0.0131 |
| M5 | 120 | 10.8 | 4.3 | 6.5 | 38 | 19.00 | 0.552 | 0.0126 |
| Promedio | | | | | | | 0.9094 | 0.0207 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M05

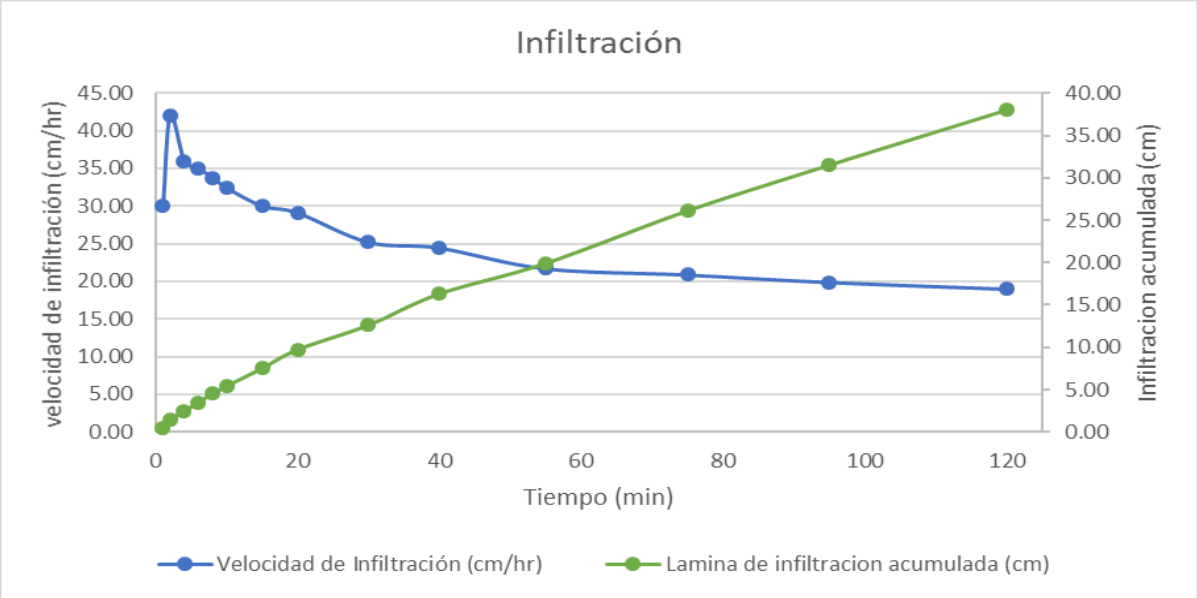
En la tabla previa se detalla el proceso completo de desarrollo de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un período de 120 minutos. Dado que el dispositivo utilizado cuenta con dos anillos, la medición del nivel de agua se basa en la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de infiltración de agua de 0,5 cm y un máximo de 6,5 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M5 indican una variabilidad en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que representa la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones a lo largo del tiempo, pero en general se mantiene relativamente constante. Esto sugiere que el suelo mantiene una permeabilidad consistente a lo largo del período de medición. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también muestra variaciones, aunque en promedio se mantiene estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M5 es de 0,9094 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0207 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M5 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una buena capacidad de drenaje y una potencial utilidad para usos agrícolas o de gestión de recursos hídricos.

**Figura 12**

*Resultados de la muestra M05*




**Nota.** Se muestra imagen del resultado de la muestra M05.

Se observó una velocidad mínima infiltración mínima es de 19,00 cm/h y una velocidad máxima de 42,00 cm/h. El volumen máximo de agua infiltrada acumulada es de 38,00 $cm^3$.

**Tabla 10**

*Datos de la muestra M06*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M6 | 1 | 12.6 | 10.9 | 1.7 | 1.7 | 102.00 | 3.608 | 0.0823 |
| M6 | 2 | 10.9 | 9.7 | 1.2 | 2.9 | 87.00 | 2.547 | 0.0581 |
| M6 | 4 | 9.7 | 8 | 1.7 | 4.6 | 69.00 | 1.804 | 0.0412 |
| M6 | 6 | 8 | 7 | 1 | 5.6 | 56.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M6 | 8 | 7 | 6.4 | 0.6 | 6.2 | 46.50 | 0.637 | 0.0145 |
| M6 | 10 | 6.4 | 4.6 | 1.8 | 8 | 48.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M6 | 15 | 14 | 12.7 | 1.3 | 9.3 | 37.20 | 0.552 | 0.0126 |
| M6 | 20 | 12.7 | 10.4 | 2.3 | 11.6 | 34.80 | 0.976 | 0.0223 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M6 | 30 | 10.4 | 5.5 | 4.9 | 16.5 | 33.00 | 1.040 | 0.0237 |
| M6 | 40 | 5.5 | 2.5 | 3 | 19.5 | 29.25 | 0.637 | 0.0145 |
| M6 | 55 | 14 | 9.6 | 4.4 | 23.9 | 26.07 | 0.623 | 0.0142 |
| M6 | 75 | 9.6 | 7.8 | 1.8 | 25.7 | 20.56 | 0.191 | 0.0044 |
| M6 | 95 | 14 | 8 | 6 | 31.7 | 20.02 | 0.637 | 0.0145 |
| M6 | 120 | 14 | 4 | 10 | 41.7 | 20.85 | 0.849 | 0.0194 |
| Promedio | | | | | | | 1.2194 | 0.0278 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M06

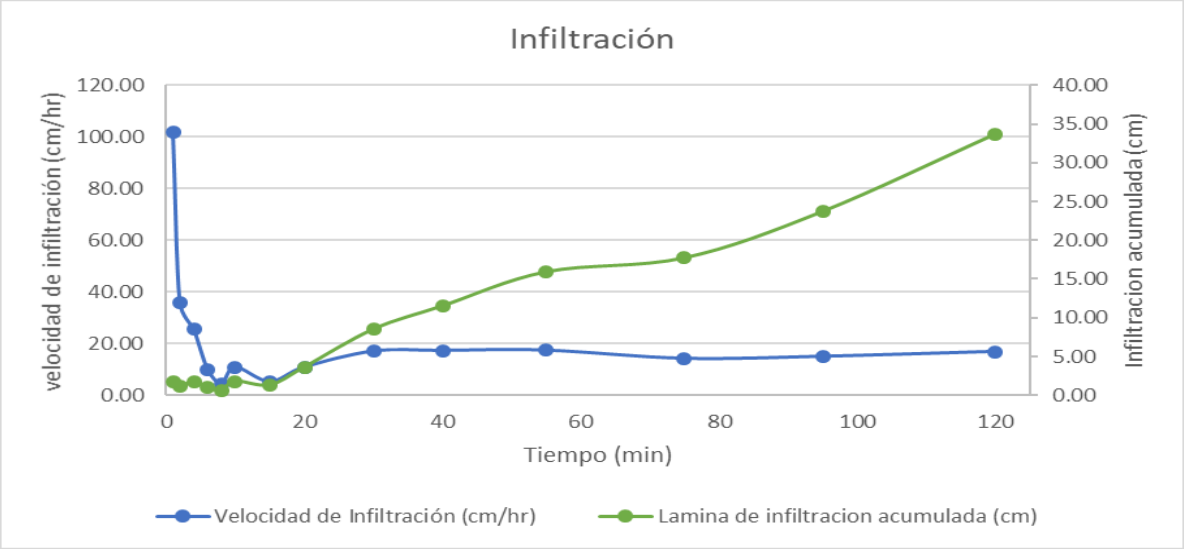
En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,6 cm y un máximo de 10,00 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M6 reflejan una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo, con algunos picos y valles. Esto sugiere que el suelo experimenta cambios en su permeabilidad a lo largo del tiempo de medición. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que representa la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en promedio se mantiene relativamente constante.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M6 es de 1,2194 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0278 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M6 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una buena capacidad de drenaje y una potencial utilidad para usos agrícolas o de gestión de recursos hídricos.

**Figura 13**

*Resultados de la muestra M06*




**Nota.** Se muestra imagen del resultado de la muestra M6

Se observó una velocidad mínima de infiltración de 14,16 cm/h y una velocidad máxima de 102,00 cm/h. Además, se registró un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 33,70 centímetros cúbicos.

**Tabla 11**

*Datos de la muestra M07*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M7 | 1 | 17.1 | 17 | 0.1 | 0.1 | 6.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M7 | 2 | 17 | 16.8 | 0.2 | 0.3 | 9.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M7 | 4 | 16.8 | 16.7 | 0.1 | 0.4 | 6.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M7 | 6 | 16.7 | 16.4 | 0.3 | 0.7 | 7.00 | 0.318 | 0.0073 |
| M7 | 8 | 16.4 | 16.2 | 0.2 | 0.9 | 6.75 | 0.212 | 0.0048 |
| M7 | 10 | 16.2 | 16.1 | 0.1 | 1 | 6.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M7 | 15 | 16.1 | 16 | 0.1 | 1.1 | 4.40 | 0.042 | 0.0010 |
| M7 | 20 | 16 | 15.9 | 0.1 | 1.2 | 3.60 | 0.042 | 0.0010 |
| M7 | 30 | 15.9 | 15.5 | 0.4 | 1.6 | 3.20 | 0.085 | 0.0019 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M7 | 40 | 15.5 | 15 | 0.5 | 2.1 | 3.15 | 0.106 | 0.0024 |
| M7 | 55 | 15 | 14.5 | 0.5 | 2.6 | 2.84 | 0.071 | 0.0016 |
| M7 | 75 | 14.5 | 14.2 | 0.3 | 2.9 | 2.32 | 0.032 | 0.0007 |
| M7 | 95 | 14.2 | 13.9 | 0.3 | 3.2 | 2.02 | 0.032 | 0.0007 |
| M7 | 120 | 13.9 | 13.5 | 0.4 | 3.6 | 1.80 | 0.034 | 0.0008 |
| Promedio | | | | | | | 0.1301 | 0.0030 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M07

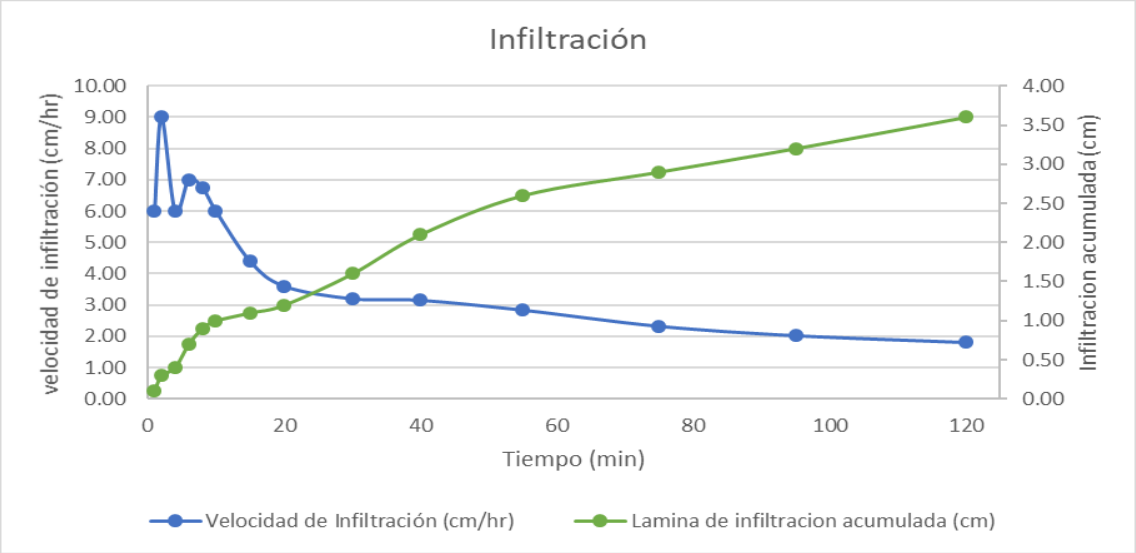
En la tabla anterior se presenta el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,1 cm y un máximo de 0,50 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M7 muestran una tasa de infiltración y una conductividad hidráulica que varían a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones notables, con valores que oscilan entre 0,0320 cm/hr y 0,4240 cm/hr. Esto sugiere que el suelo puede tener áreas con diferentes niveles de permeabilidad. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en menor medida.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M7 es de 0,1301 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0030 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M7 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada, pero posiblemente no tan alta como en otros casos. Esto podría influir en la idoneidad del suelo para diferentes usos, como la agricultura o la gestión de recursos hídricos.

**Figura 14**

*Resultados de la muestra M07*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M7.

Se registró una velocidad mínima de 1,80 cm/h y una velocidad máxima de 6,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada fue de 3,60 $cm^3$.

**Tabla 12**

*Datos de la Muestra M08*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M8 | 1 | 16 | 15.9 | 0.1 | 0.1 | 6.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M8 | 2 | 15.9 | 15.8 | 0.1 | 0.2 | 6.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M8 | 4 | 15.8 | 15.7 | 0.1 | 0.3 | 4.50 | 0.106 | 0.0024 |
| M8 | 6 | 15.7 | 15.6 | 0.1 | 0.4 | 4.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M8 | 8 | 15.6 | 15.5 | 0.1 | 0.5 | 3.75 | 0.106 | 0.0024 |
| M8 | 10 | 15.5 | 15.4 | 0.1 | 0.6 | 3.60 | 0.106 | 0.0024 |
| M8 | 15 | 15.4 | 15.1 | 0.3 | 0.9 | 3.60 | 0.127 | 0.0029 |
| M8 | 20 | 15.1 | 15 | 0.1 | 1 | 3.00 | 0.042 | 0.0010 |
| M8 | 30 | 15 | 14.8 | 0.2 | 1.2 | 2.40 | 0.042 | 0.0010 |
| M8 | 40 | 14.8 | 14.6 | 0.2 | 1.4 | 2.10 | 0.042 | 0.0010 |
| M8 | 55 | 14.6 | 14.2 | 0.4 | 1.8 | 1.96 | 0.057 | 0.0013 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M8 | 75 | 14.2 | 14 | 0.2 | 2 | 1.60 | 0.021 | 0.0005 |
| M8 | 95 | 14 | 13.7 | 0.3 | 2.3 | 1.45 | 0.032 | 0.0007 |
| M8 | 120 | 13.7 | 13.4 | 0.3 | 2.6 | 1.30 | 0.025 | 0.0006 |
| Promedio | | | | | | | 0.0883 | 0.0020 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M08

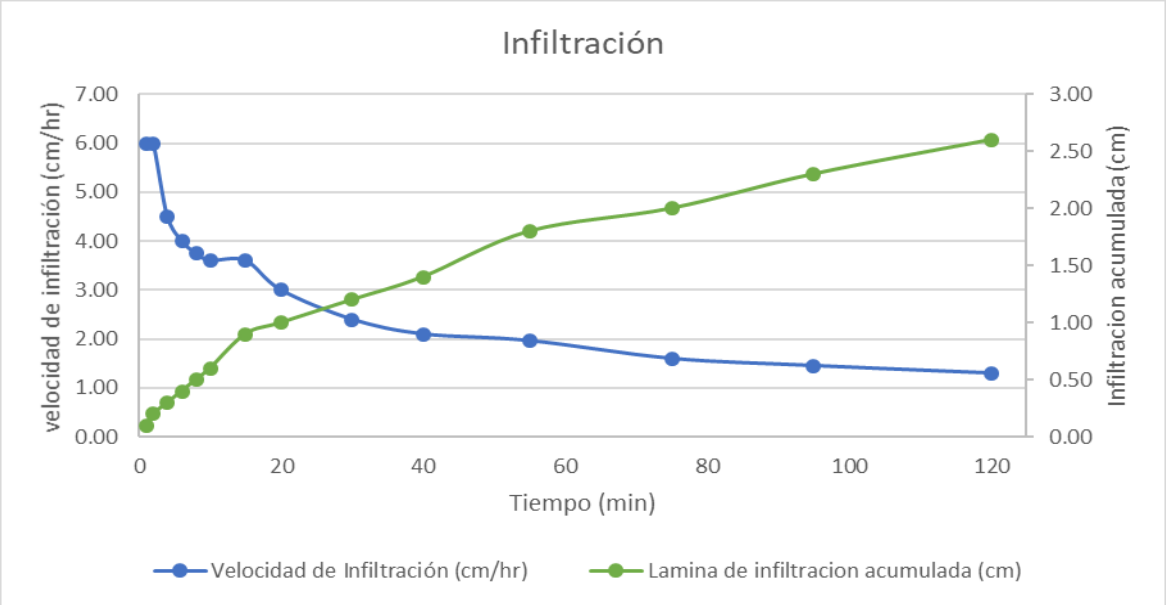
En la tabla anterior se muestra el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,1 cm y un máximo de 0,40 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M8 muestran una tasa de infiltración y una conductividad hidráulica que varían a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones notables, con valores que oscilan entre 0,0210 cm/hr y 0,2120 cm/hr. Esto sugiere que el suelo puede tener áreas con diferentes niveles de permeabilidad. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en menor medida.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M8 es de 0,0883 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0020 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M8 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada, pero posiblemente no tan alta como en otros casos. Esto podría influir en la idoneidad del suelo para diferentes usos, como la agricultura o la gestión de recursos hídricos.

**Figura 15**

*Resultados de la muestra M08*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M8.

Se observó una velocidad mínima de infiltración de 1,30 cm/h y la máxima de 6,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada fue de 2600 $cm^3$.

**Tabla 13**

*Datos de la muestra M09*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M9 | 1 | 16.2 | 16 | 0.2 | 0.2 | 12.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M9 | 2 | 16 | 15.8 | 0.2 | 0.4 | 12.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M9 | 4 | 15.8 | 15.7 | 0.1 | 0.5 | 7.50 | 0.106 | 0.0024 |
| M9 | 6 | 15.7 | 15.6 | 0.1 | 0.6 | 6.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M9 | 8 | 15.6 | 15.5 | 0.1 | 0.7 | 5.25 | 0.106 | 0.0024 |
| M9 | 10 | 15.5 | 15.4 | 0.1 | 0.8 | 4.80 | 0.106 | 0.0024 |
| M9 | 15 | 15.4 | 15.1 | 0.3 | 1.1 | 4.40 | 0.127 | 0.0029 |
| M9 | 20 | 15.1 | 15 | 0.1 | 1.2 | 3.60 | 0.042 | 0.0010 |
| M9 | 30 | 15 | 14.8 | 0.2 | 1.4 | 2.80 | 0.042 | 0.0010 |
| M9 | 40 | 14.8 | 14.6 | 0.2 | 1.6 | 2.40 | 0.042 | 0.0010 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M9 | 55 | 14.6 | 14.2 | 0.4 | 2 | 2.18 | 0.057 | 0.0013 |
| M9 | 75 | 14.2 | 13.9 | 0.3 | 2.3 | 1.84 | 0.032 | 0.0007 |
| M9 | 95 | 13.9 | 13.7 | 0.2 | 2.5 | 1.58 | 0.021 | 0.0005 |
| M9 | 120 | 13.7 | 13.3 | 0.4 | 2.9 | 1.45 | 0.034 | 0.0008 |
| Promedio | | | | | | | 0.1192 | 0.0027 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M09

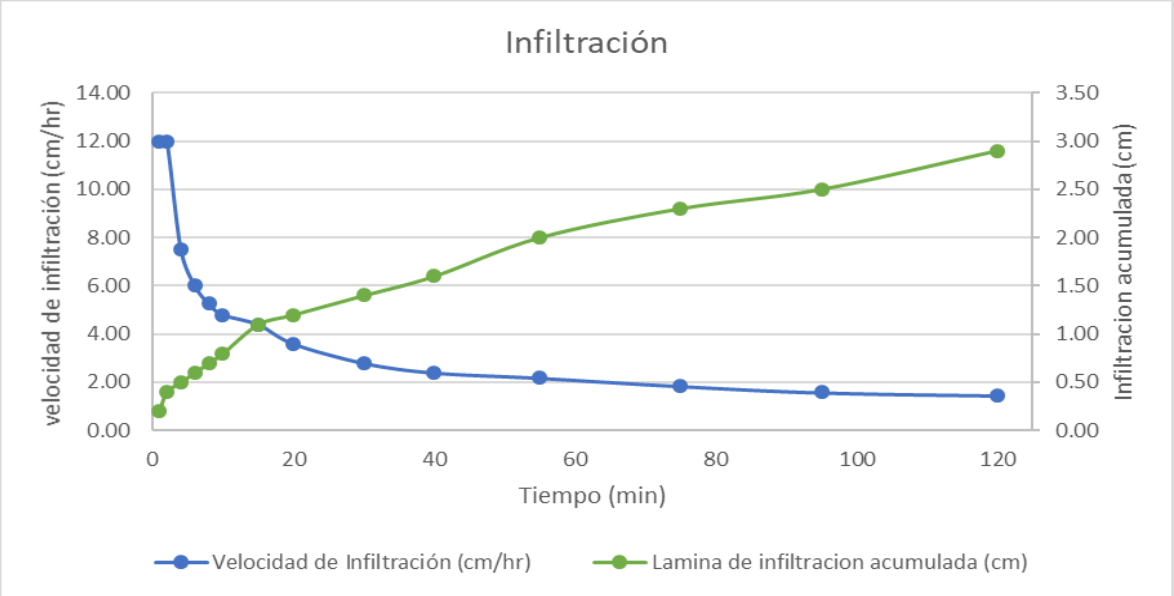
En la tabla anterior se presenta el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,1 cm y un máximo de 0,40 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M9 muestran una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones a lo largo del tiempo, pero en general se mantiene relativamente constante, con valores que oscilan entre 0,0210 cm/hr y 0,4240 cm/hr. Esto sugiere que el suelo puede tener áreas con diferentes niveles de permeabilidad, pero en promedio mantiene una tasa de infiltración moderada. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en general tiende a mantenerse estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M9 es de 0,1192 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0027 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M9 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada para diversas aplicaciones, como la agricultura o la gestión de recursos hídricos.

**Figura 16**

*Resultados de la muestra M09*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M09.

Se observó una velocidad mínima de infiltración de 1,45 cm/h y una velocidad máxima de 12,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada fue de 2900 $cm^3$.

**Tabla 14**

*Datos de la muestra M10*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M10 | 1 | 17 | 15.7 | 1.3 | 1.3 | 78.00 | 2.759 | 0.0630 |
| M10 | 2 | 15.7 | 15.1 | 0.6 | 1.9 | 57.00 | 1.273 | 0.0291 |
| M10 | 4 | 15.1 | 14.4 | 0.7 | 2.6 | 39.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M10 | 6 | 14.4 | 13.6 | 0.8 | 3.4 | 34.00 | 0.849 | 0.0194 |
| M10 | 8 | 13.6 | 13 | 0.6 | 4 | 30.00 | 0.637 | 0.0145 |
| M10 | 10 | 13 | 12.6 | 0.4 | 4.4 | 26.40 | 0.424 | 0.0097 |
| M10 | 15 | 12.6 | 11.5 | 1.1 | 5.5 | 22.00 | 0.467 | 0.0107 |
| M10 | 20 | 11.5 | 10.5 | 1 | 6.5 | 19.50 | 0.424 | 0.0097 |
| M10 | 30 | 10.5 | 9.2 | 1.3 | 7.8 | 15.60 | 0.276 | 0.0063 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M10 | 40 | 9.2 | 8 | 1.2 | 9 | 13.50 | 0.255 | 0.0058 |
| M10 | 55 | 8 | 6.5 | 1.5 | 10.5 | 11.45 | 0.212 | 0.0048 |
| M10 | 75 | 6.5 | 4.6 | 1.9 | 12.4 | 9.92 | 0.202 | 0.0046 |
| M10 | 95 | 15 | 12.5 | 2.5 | 14.9 | 9.41 | 0.265 | 0.0061 |
| M10 | 120 | 12.5 | 10 | 2.5 | 17.4 | 8.70 | 0.212 | 0.0048 |
| Promedio | | | | | | | 0.6427 | 0.0147 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M10

En la tabla anterior se fija todo el proceso de incremento de la muestra, para la que se consideran 14 mediciones, en un intervalo de tiempo de 120 min.

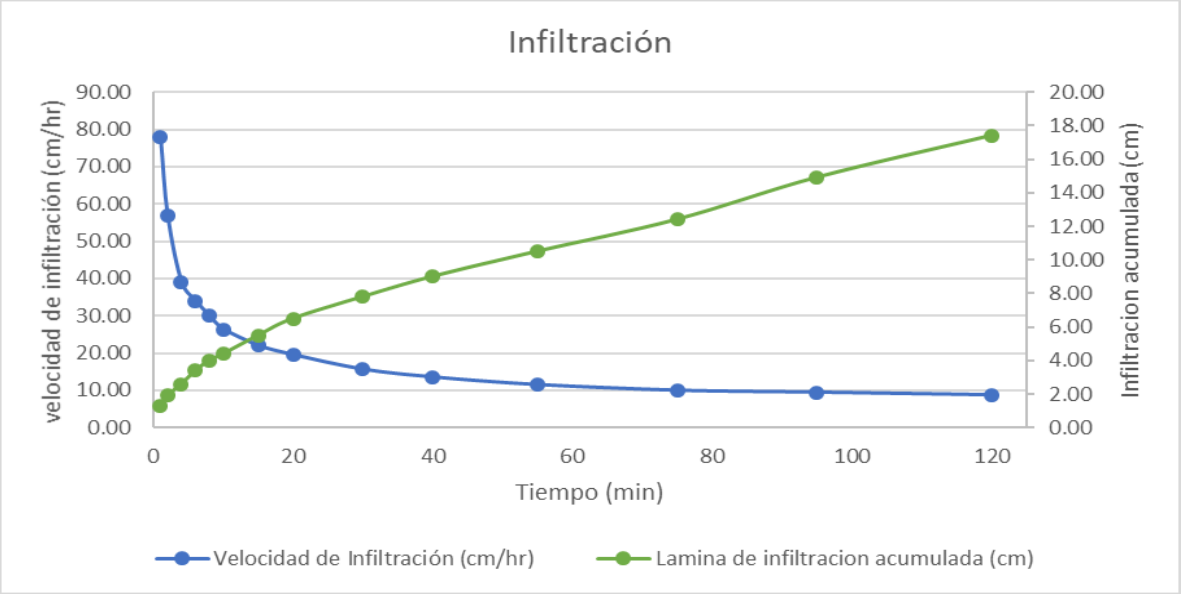
Como el medidor es de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre los dos anillos. El nivel de agua infiltrada mínimo es de 0,4 cm y el máximo de 2,50 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M10 muestran una variabilidad en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones considerables a lo largo del tiempo, con valores que oscilan entre 0,2020 cm/hr y 2,7590 cm/hr. Esto sugiere que el suelo puede tener áreas con diferentes niveles de permeabilidad, pero en promedio, la tasa de infiltración es moderadamente alta. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en general tiende a mantenerse relativamente estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M10 es de 0,6427 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0147 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M10 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una buena capacidad de drenaje y una potencial utilidad para usos agrícolas o de gestión de recursos hídricos.

**Figura 17**

*Resultados de la muestra M10*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M10.

La velocidad de infiltración mínima registrada es de 8,70 cm/h y la máxima de 78,00 cm/h. El volumen máximo de agua infiltrada acumulada es de 17,400 cm³.

**Tabla 15**

*Datos de la muestra M11*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M11 | 1 | 18 | 16.5 | 1.5 | 1.5 | 90.00 | 3.184 | 0.0727 |
| M11 | 2 | 16.5 | 16.1 | 0.4 | 1.9 | 57.00 | 0.849 | 0.0194 |
| M11 | 4 | 16.1 | 15.8 | 0.3 | 2.2 | 33.00 | 0.318 | 0.0073 |
| M11 | 6 | 15.8 | 15.7 | 0.1 | 2.3 | 23.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M11 | 8 | 15.7 | 15.6 | 0.1 | 2.4 | 18.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M11 | 10 | 15.6 | 15.5 | 0.1 | 2.5 | 15.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M11 | 15 | 15.5 | 15.3 | 0.2 | 2.7 | 10.80 | 0.085 | 0.0019 |
| M11 | 20 | 15.3 | 15 | 0.3 | 3 | 9.00 | 0.127 | 0.0029 |
| M11 | 30 | 15 | 14.7 | 0.3 | 3.3 | 6.60 | 0.064 | 0.0015 |
| M11 | 40 | 14.7 | 14.4 | 0.3 | 3.6 | 5.40 | 0.064 | 0.0015 |
| M11 | 55 | 14.4 | 14.1 | 0.3 | 3.9 | 4.25 | 0.042 | 0.0010 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M11 | 75 | 14.1 | 13.8 | 0.3 | 4.2 | 3.36 | 0.032 | 0.0007 |
| M11 | 95 | 13.8 | 13.3 | 0.5 | 4.7 | 2.97 | 0.053 | 0.0012 |
| M11 | 120 | 13.3 | 12.9 | 0.4 | 5.1 | 2.55 | 0.034 | 0.0008 |
| Promedio | | | | | | | 0.3693 | 0.0084 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M11

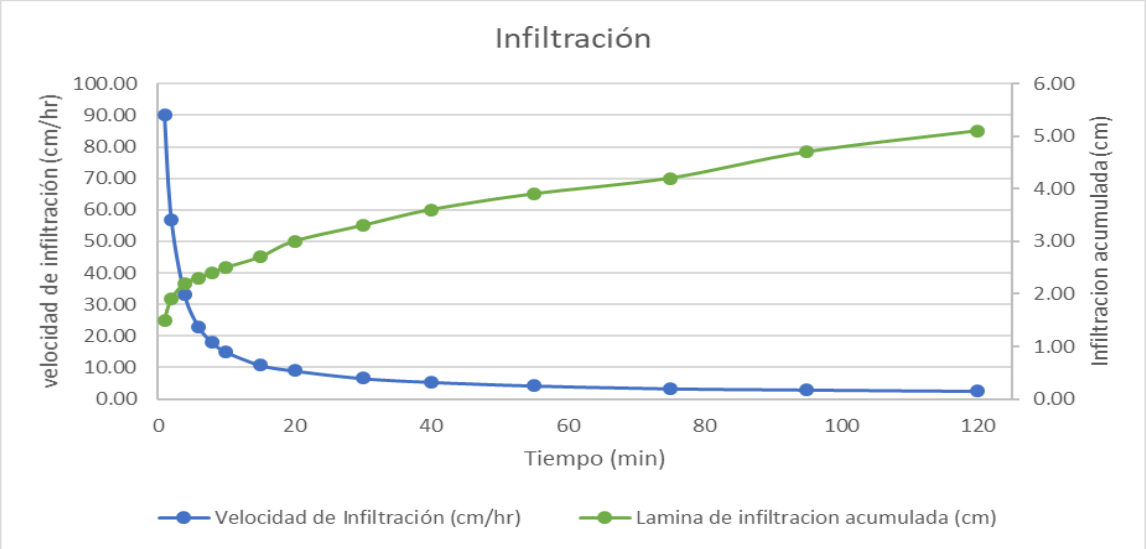
En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,1 cm y un máximo de 1,50 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M11 muestran una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, experimenta fluctuaciones significativas a lo largo del tiempo, con valores que oscilan entre 0,0320 cm/hr y 3,1840 cm/hr. Esto sugiere que el suelo puede tener áreas con diferentes niveles de permeabilidad, y en este caso, hay períodos de alta capacidad de infiltración seguidos de disminuciones abruptas. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también muestra variaciones, aunque en general tiende a mantenerse relativamente estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M11 es de 0,3693 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0084 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M11 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, aunque con fluctuaciones significativas en la tasa de infiltración que podrían influir en su capacidad de drenaje y su uso potencial en aplicaciones agrícolas o de gestión de recursos hídricos.

**Figura 18**

*Resultados de la muestra M11*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M11.

Se observó una velocidad mínima de infiltración de 2,55 cm/h y una velocidad máxima de 90,00 cm/h. Además, el volumen máximo de agua infiltrada acumulada alcanzó los 5100 $cm^3$.

**Tabla 16**

*Datos de la muestra M12*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M12 | 1 | 17.5 | 17.4 | 0.1 | 0.1 | 6.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M12 | 2 | 17.4 | 17.2 | 0.2 | 0.3 | 9.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M12 | 4 | 17.2 | 17 | 0.2 | 0.5 | 7.50 | 0.212 | 0.0048 |
| M12 | 6 | 17 | 16.9 | 0.1 | 0.6 | 6.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M12 | 8 | 16.9 | 16.7 | 0.2 | 0.8 | 6.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M12 | 10 | 16.7 | 16.5 | 0.2 | 1 | 6.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M12 | 15 | 16.5 | 16.3 | 0.2 | 1.2 | 4.80 | 0.085 | 0.0019 |
| M12 | 20 | 16.3 | 16.2 | 0.1 | 1.3 | 3.90 | 0.042 | 0.0010 |
| M12 | 30 | 16.2 | 16 | 0.2 | 1.5 | 3.00 | 0.042 | 0.0010 |
| M12 | 40 | 16 | 15.8 | 0.2 | 1.7 | 2.55 | 0.042 | 0.0010 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M12 | 55 | 15.8 | 15.6 | 0.2 | 1.9 | 2.07 | 0.028 | 0.0006 |
| M12 | 75 | 15.6 | 15.4 | 0.2 | 2.1 | 1.68 | 0.021 | 0.0005 |
| M12 | 95 | 15.4 | 15.2 | 0.2 | 2.3 | 1.45 | 0.021 | 0.0005 |
| M12 | 120 | 15.2 | 15 | 0.2 | 2.5 | 1.25 | 0.017 | 0.0004 |
| Promedio | | | | | | | 0.1197 | 0.0027 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M12

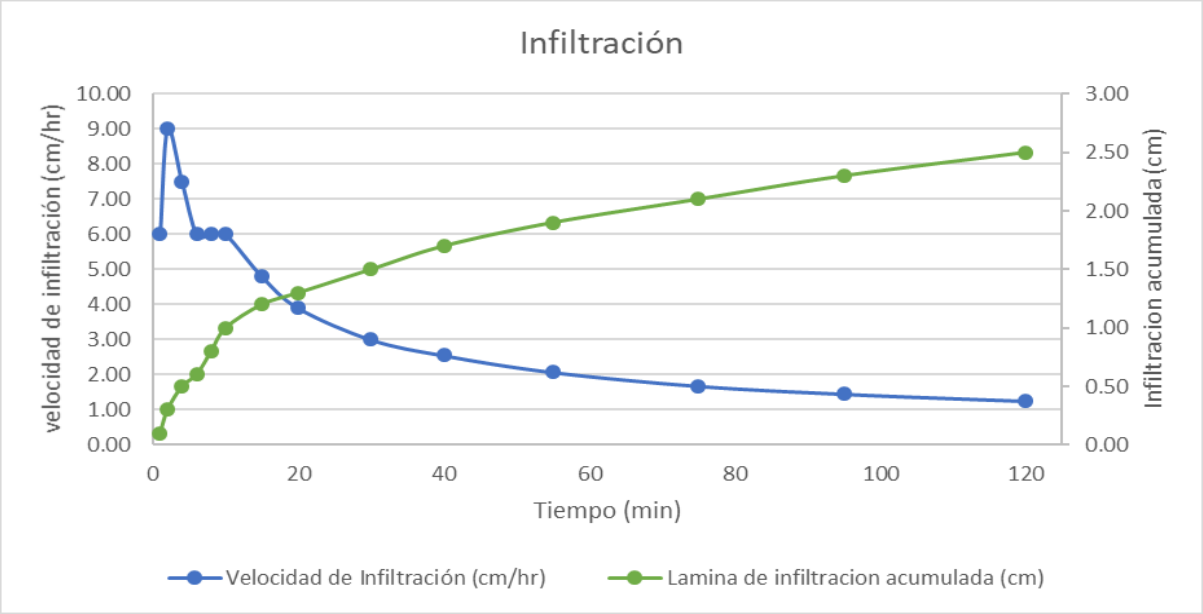
En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,1 cm y un máximo de 0,20 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M12 muestran una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones a lo largo del tiempo, pero en general se mantiene relativamente baja, con valores que oscilan entre 0,0170 cm/hr y 0,4240 cm/hr. Esto sugiere que el suelo tiene una permeabilidad variable, pero en promedio, la tasa de infiltración es moderadamente baja. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en general tiende a mantenerse estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M12 es de 0,1197 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0.0027 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M12 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada para diversas aplicaciones, aunque con una tasa de infiltración relativamente baja.

**Figura 19**

*Resultados de la muestra 12*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M12.

Se observó una velocidad infiltrada de 1,25 cm/h y una velocidad máxima de 9,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada fue de 2500 cm.

**Tabla 17**

*Datos de la muestra M13*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M13 | 1 | 21 | 20.1 | 0.9 | 0.9 | 54.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M13 | 2 | 20.1 | 19.8 | 0.3 | 1.2 | 36.00 | 0.637 | 0.0145 |
| M13 | 4 | 19.8 | 19.7 | 0.1 | 1.3 | 19.50 | 0.106 | 0.0024 |
| M13 | 6 | 19.7 | 19.6 | 0.1 | 1.4 | 14.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M13 | 8 | 19.6 | 19 | 0.6 | 2 | 15.00 | 0.637 | 0.0145 |
| M13 | 10 | 19 | 18.9 | 0.1 | 2.1 | 12.60 | 0.106 | 0.0024 |
| M13 | 15 | 18.9 | 18.4 | 0.5 | 2.6 | 10.40 | 0.212 | 0.0048 |
| M13 | 20 | 18.4 | 17.9 | 0.5 | 3.1 | 9.30 | 0.212 | 0.0048 |
| M13 | 30 | 17.9 | 17.2 | 0.7 | 3.8 | 7.60 | 0.149 | 0.0034 |
| M13 | 40 | 17.2 | 16.5 | 0.7 | 4.5 | 6.75 | 0.149 | 0.0034 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M13 | 55 | 16.5 | 15.8 | 0.7 | 5.2 | 5.67 | 0.099 | 0.0023 |
| M13 | 75 | 15.8 | 15 | 0.8 | 6 | 4.80 | 0.085 | 0.0019 |
| M13 | 95 | 15 | 14.4 | 0.6 | 6.6 | 4.17 | 0.064 | 0.0015 |
| M13 | 120 | 14.4 | 13.7 | 0.7 | 7.3 | 3.65 | 0.059 | 0.0014 |
| Promedio | | | | | | | 0.3236 | 0.0074 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M13

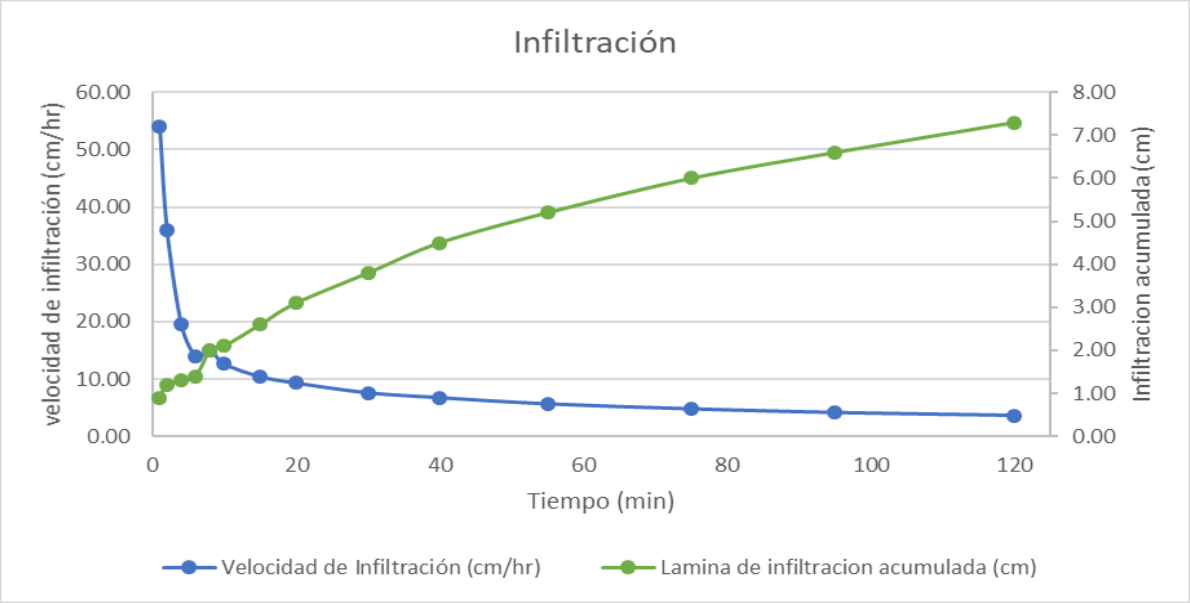
En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor cuenta con dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,1 cm y un máximo de 0,90 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M13 muestran una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, muestra fluctuaciones a lo largo del tiempo, con valores que oscilan entre 0,0590 cm/hr y 1,9100 cm/hr. Esto sugiere que el suelo tiene áreas con diferentes niveles de permeabilidad, mostrando períodos de mayor y menor capacidad de infiltración. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en general tiende a mantenerse relativamente estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M13 es de 0,3236 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0074 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M13 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada para diversas aplicaciones, aunque con fluctuaciones significativas en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo.

**Figura 20**

*Resultados de la muestra M13*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M13.

Se ha registrado una velocidad mínima de infiltración de 3,65 cm/h y una velocidad máxima de 54,00 cm/h. Además, se alcanzó un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 7300 $cm^3$.

**Tabla 18**

*Datos de la muestra M14*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M14 | 1 | 21.4 | 20.9 | 0.5 | 0.5 | 30.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M14 | 2 | 20.9 | 20.3 | 0.6 | 1.1 | 33.00 | 1.273 | 0.0291 |
| M14 | 4 | 20.3 | 20.1 | 0.2 | 1.3 | 19.50 | 0.212 | 0.0048 |
| M14 | 6 | 20.1 | 19.4 | 0.7 | 2 | 20.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M14 | 8 | 19.4 | 18.5 | 0.9 | 2.9 | 21.75 | 0.955 | 0.0218 |
| M14 | 10 | 18.5 | 18.1 | 0.4 | 3.3 | 19.80 | 0.424 | 0.0097 |
| M14 | 15 | 18.1 | 17.5 | 0.6 | 3.9 | 15.60 | 0.255 | 0.0058 |
| M14 | 20 | 17.5 | 16.7 | 0.8 | 4.7 | 14.10 | 0.340 | 0.0077 |
| M14 | 30 | 16.7 | 15.3 | 1.4 | 6.1 | 12.20 | 0.297 | 0.0068 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M14 | 40 | 15.3 | 14 | 1.3 | 7.4 | 11.10 | 0.276 | 0.0063 |
| M14 | 55 | 14 | 12.8 | 1.2 | 8.6 | 9.38 | 0.170 | 0.0039 |
| M14 | 75 | 12.8 | 10.5 | 2.3 | 10.9 | 8.72 | 0.244 | 0.0056 |
| M14 | 95 | 10.5 | 8.5 | 2 | 12.9 | 8.15 | 0.212 | 0.0048 |
| M14 | 120 | 8.5 | 6.4 | 2.1 | 15 | 7.50 | 0.178 | 0.0041 |
| Promedio | | | | | | | 0.4743 | 0.0108 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M14

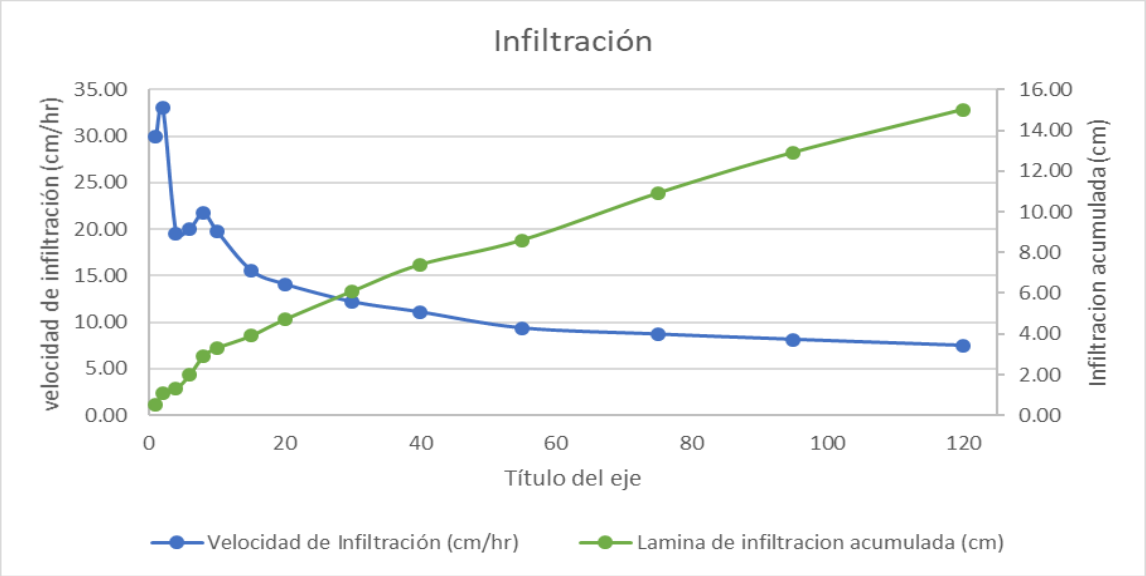
En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,2 cm y un máximo de 2,30 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M14 muestran una variabilidad en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, experimenta fluctuaciones a lo largo del tiempo, con valores que oscilan entre 0,1700 cm/hr y 1,2730 cm/hr. Esto sugiere que el suelo presenta diferentes niveles de permeabilidad en diferentes momentos del ensayo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también varía, aunque en general mantiene una tendencia estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M14 es de 0,4743 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0108 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M14 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada para diversas aplicaciones, aunque con fluctuaciones notables en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo.

**Figura 21**

*Resultados de la muestra M14*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M14.

Se ha registrado una velocidad mínima de infiltración de 7,50 cm/h y una velocidad máxima de 33,00 cm/h. Además, se alcanzó un volumen máximo de agua infiltrada acumulada de 15,00 cm.

**Tabla 19**

*Datos de la muestra M15*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M15 | 1 | 11 | 9 | 2 | 2 | 120.00 | 4.245 | 0.0969 |
| M15 | 2 | 9 | 7.4 | 1.6 | 3.6 | 108.00 | 3.396 | 0.0775 |
| M15 | 4 | 7.4 | 6.1 | 1.3 | 4.9 | 73.50 | 1.380 | 0.0315 |
| M15 | 6 | 6.1 | 4.9 | 1.2 | 6.1 | 61.00 | 1.273 | 0.0291 |
| M15 | 8 | 4.9 | 3.9 | 1 | 7.1 | 53.25 | 1.061 | 0.0242 |
| M15 | 10 | 3.9 | 3 | 0.9 | 8 | 48.00 | 0.955 | 0.0218 |
| M15 | 15 | 10 | 9.1 | 0.9 | 8.9 | 35.60 | 0.382 | 0.0087 |
| M15 | 20 | 9.1 | 8 | 1.1 | 10 | 30.00 | 0.467 | 0.0107 |
| M15 | 30 | 8 | 6.8 | 1.2 | 11.2 | 22.40 | 0.255 | 0.0058 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M15 | 40 | 6.8 | 5.8 | 1 | 12.2 | 18.30 | 0.212 | 0.0048 |
| M15 | 55 | 5.8 | 4.8 | 1 | 13.2 | 14.40 | 0.141 | 0.0032 |
| M15 | 75 | 10 | 9 | 1 | 14.2 | 11.36 | 0.106 | 0.0024 |
| M15 | 95 | 9 | 8 | 1 | 15.2 | 9.60 | 0.106 | 0.0024 |
| M15 | 120 | 8 | 1.7 | 6.3 | 21.5 | 10.75 | 0.535 | 0.0122 |
| Promedio | | | | | | | 1.0367 | 0.0237 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M15

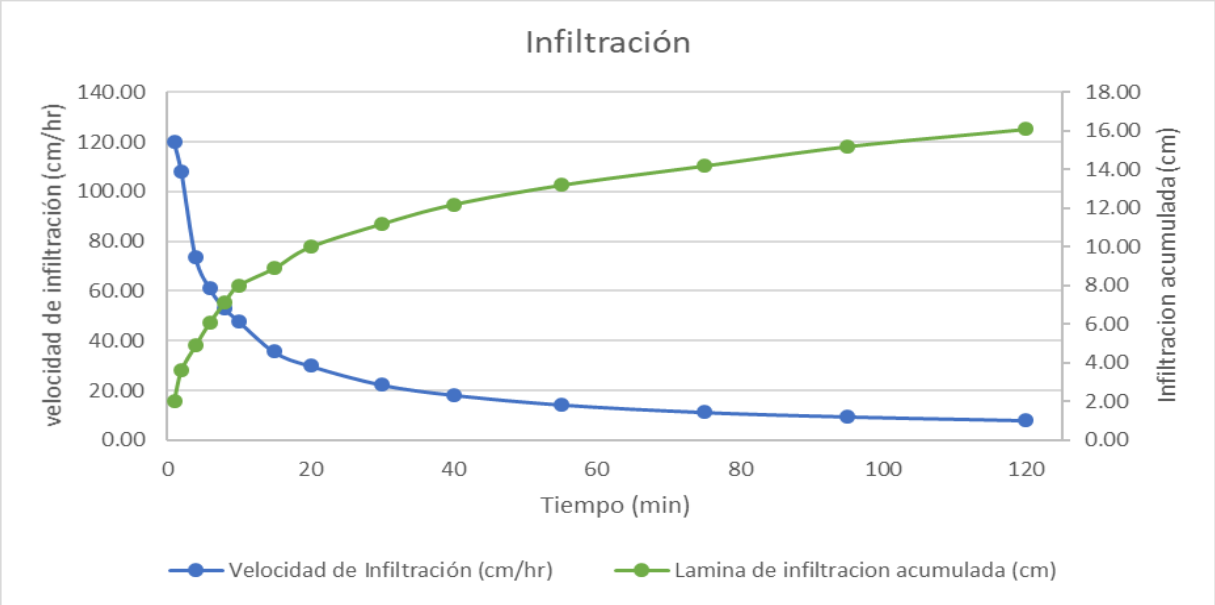
En la tabla anterior se detalla el proceso de crecimiento de la muestra, abarcando 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo de 120 minutos. El medidor, que consta de dos anillos, permite medir el nivel de agua por la diferencia entre ellos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,9 cm y un máximo de 2,00 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M15 revelan una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica durante el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que representa la velocidad de penetración del agua en el suelo, experimenta cambios notables a lo largo del ensayo, con valores que oscilan entre 0,1060 cm/hr y 4,2450 cm/hr. Esto sugiere una permeabilidad variable del suelo en diferentes momentos del ensayo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que indica la capacidad del suelo para transportar agua, también muestra variaciones, aunque en general mantiene una tendencia estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M15 es de 1,0367 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0237 cm/hr. Estos valores sugieren que, en promedio, el suelo de la muestra M15 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que implica una buena capacidad de drenaje. Sin embargo, la fluctuación en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo indica una posible variabilidad en la capacidad de infiltración del suelo.

**Figura 22**

*Resultados de la muestra M15*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M15.

Se ha registrado una velocidad mínima de infiltración de 8,05 cm/h y una velocidad máxima de 120,00 cm/h. Además, se alcanzó un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 16 100 $cm^3$.

**Tabla 20**

*Datos de la muestra M16*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M16 | 1 | 9.9 | 8 | 1.9 | 1.9 | 114.00 | 4.033 | 0.0920 |
| M16 | 2 | 8 | 7 | 1 | 2.9 | 87.00 | 2.122 | 0.0484 |
| M16 | 4 | 7 | 6.2 | 0.8 | 3.7 | 55.50 | 0.849 | 0.0194 |
| M16 | 6 | 6.2 | 5.5 | 0.7 | 4.4 | 44.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M16 | 8 | 5.5 | 4.8 | 0.7 | 5.1 | 38.25 | 0.743 | 0.0170 |
| M16 | 10 | 4.8 | 4.2 | 0.6 | 5.7 | 34.20 | 0.637 | 0.0145 |
| M16 | 15 | 10 | 9.4 | 0.6 | 6.3 | 25.20 | 0.255 | 0.0058 |
| M16 | 20 | 9.4 | 8.5 | 0.9 | 7.2 | 21.60 | 0.382 | 0.0087 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M16 | 30 | 8.5 | 8 | 0.5 | 7.7 | 15.40 | 0.106 | 0.0024 |
| M16 | 40 | 8 | 7.7 | 0.3 | 8 | 12.00 | 0.064 | 0.0015 |
| M16 | 55 | 7.7 | 7.2 | 0.5 | 8.5 | 9.27 | 0.071 | 0.0016 |
| M16 | 75 | 7.2 | 6.8 | 0.4 | 8.9 | 7.12 | 0.042 | 0.0010 |
| M16 | 95 | 6.8 | 6.4 | 0.4 | 9.3 | 5.87 | 0.042 | 0.0010 |
| M16 | 120 | 6.4 | 6.1 | 0.3 | 9.6 | 4.80 | 0.025 | 0.0006 |
| Promedio | | | | | | | 0.7224 | 0.0165 |

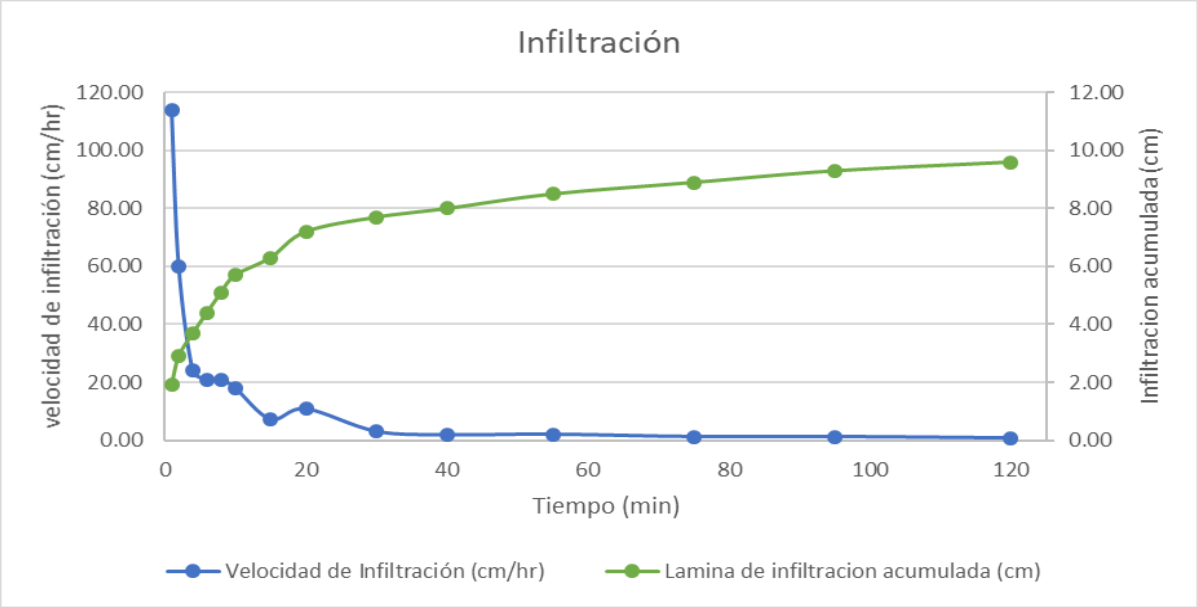
**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M16

En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se registra por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se observó un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,3 cm y un máximo de 1,90 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M16 muestran una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad de penetración del agua en el suelo, experimenta fluctuaciones a lo largo del tiempo, con valores que oscilan entre 0,0250 cm/hr y 4,0330 cm/hr. Esto sugiere que el suelo presenta áreas con diferentes niveles de permeabilidad y capacidad de infiltración. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también varía, aunque en general mantiene una tendencia estable. El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M16 es de 0,7224 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0165 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M16 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una capacidad de drenaje adecuada para diversas aplicaciones, aunque con fluctuaciones notables en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo.

**Figura 23**

*Resultados de la muestra M16*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M16.

Se ha registrado una velocidad mínima de infiltración de 0,72 cm/h y una velocidad máxima de 114,00 cm/h. Además, se ha alcanzado un volumen máximo de agua infiltrada acumulada de 9600 $cm^3$.

**Tabla 21**

*Datos de la muestra M17*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M17 | 1 | 8.6 | 6.1 | 2.5 | 2.5 | 150.00 | 5.306 | 0.1211 |
| M17 | 2 | 6.1 | 5 | 1.1 | 3.6 | 108.00 | 2.335 | 0.0533 |
| M17 | 4 | 5 | 4.1 | 0.9 | 4.5 | 67.50 | 0.955 | 0.0218 |
| M17 | 6 | 10 | 9.1 | 0.9 | 5.4 | 54.00 | 0.955 | 0.0218 |
| M17 | 8 | 9.1 | 8.3 | 0.8 | 6.2 | 46.50 | 0.849 | 0.0194 |
| M17 | 10 | 8.3 | 7.7 | 0.6 | 6.8 | 40.80 | 0.637 | 0.0145 |
| M17 | 15 | 7.7 | 7.1 | 0.6 | 7.4 | 29.60 | 0.255 | 0.0058 |
| M17 | 20 | 7.1 | 6.4 | 0.7 | 8.1 | 24.30 | 0.297 | 0.0068 |
| M17 | 30 | 6.4 | 5.8 | 0.6 | 8.7 | 17.40 | 0.127 | 0.0029 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M17 | 40 | 5.8 | 5.3 | 0.5 | 9.2 | 13.80 | 0.106 | 0.0024 |
| M17 | 55 | 5.3 | 4.9 | 0.4 | 9.6 | 10.47 | 0.057 | 0.0013 |
| M17 | 75 | 4.9 | 4.5 | 0.4 | 10 | 8.00 | 0.042 | 0.0010 |
| M17 | 95 | 4.5 | 4 | 0.5 | 10.5 | 6.63 | 0.053 | 0.0012 |
| M17 | 120 | 4 | 3.5 | 0.5 | 11 | 5.50 | 0.042 | 0.0010 |
| Promedio | | | | | | | 0.8583 | 0.0196 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M17

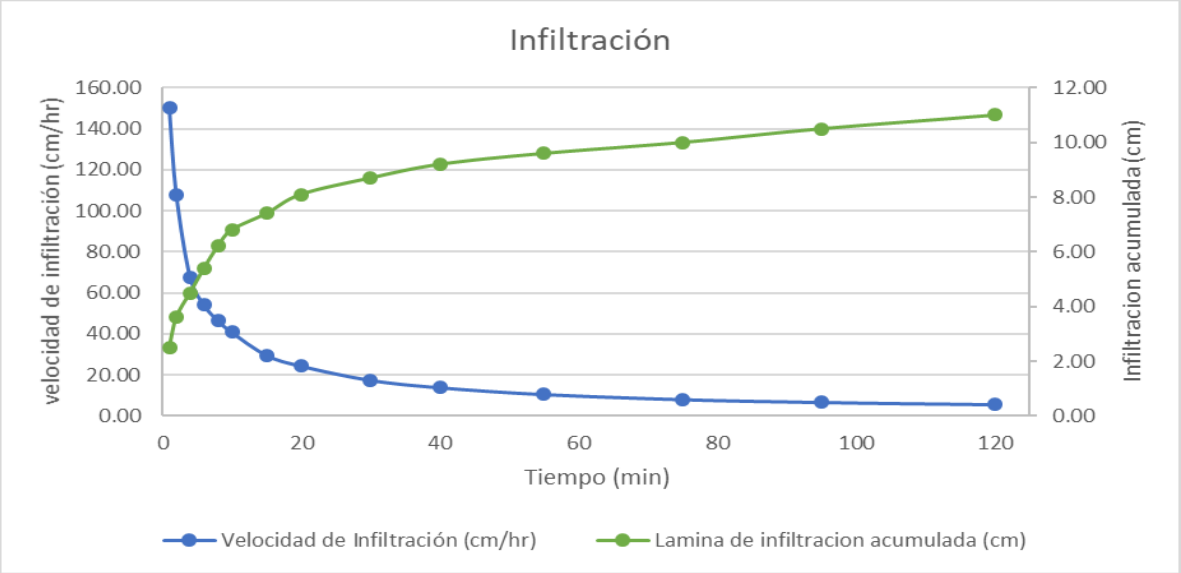
En la tabla anterior se presenta el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,4 cm y un máximo de 2,50 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M17 reflejan una variabilidad en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, muestra fluctuaciones a lo largo del tiempo, con valores que van desde 0,0420 cm/hr hasta 5,3060 cm/hr. Esto sugiere una heterogeneidad en la capacidad de infiltración del suelo en diferentes momentos del ensayo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que representa la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta variaciones, aunque en general mantiene una tendencia estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M17 es de 0,8583 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0196 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M17 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una buena capacidad de drenaje. Sin embargo, la variabilidad en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo sugiere una posible heterogeneidad en la permeabilidad del suelo.

**Figura 24**

*Resultados de la muestra M17*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M17.

Se ha registrado una velocidad mínima de infiltración de 5,50 cm/h y una velocidad máxima de 150,00 cm/h. Además, se alcanzó un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 11 000 $cm^3$.

**Tabla 22**

*Datos de la muestra M18*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M18 | 1 | 7 | 4.6 | 2.4 | 2.4 | 144.00 | 5.094 | 0.1162 |
| M18 | 2 | 4.6 | 3.4 | 1.2 | 3.6 | 108.00 | 2.547 | 0.0581 |
| M18 | 4 | 3.4 | 2.5 | 0.9 | 4.5 | 67.50 | 0.955 | 0.0218 |
| M18 | 6 | 10 | 9.2 | 0.8 | 5.3 | 53.00 | 0.849 | 0.0194 |
| M18 | 8 | 9.2 | 8.5 | 0.7 | 6 | 45.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M18 | 10 | 8.5 | 8.1 | 0.4 | 6.4 | 38.40 | 0.424 | 0.0097 |
| M18 | 15 | 8.1 | 7.6 | 0.5 | 6.9 | 27.60 | 0.212 | 0.0048 |
| M18 | 20 | 7.6 | 6.9 | 0.7 | 7.6 | 22.80 | 0.297 | 0.0068 |
| M18 | 30 | 6.9 | 6.2 | 0.7 | 8.3 | 16.60 | 0.149 | 0.0034 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M18 | 40 | 6.2 | 5.6 | 0.6 | 8.9 | 13.35 | 0.127 | 0.0029 |
| M18 | 55 | 5.6 | 5 | 0.6 | 9.5 | 10.36 | 0.085 | 0.0019 |
| M18 | 75 | 5 | 4.5 | 0.5 | 10 | 8.00 | 0.053 | 0.0012 |
| M18 | 95 | 4.5 | 3.9 | 0.6 | 10.6 | 6.69 | 0.064 | 0.0015 |
| M18 | 120 | 3.9 | 3.4 | 0.5 | 11.1 | 5.55 | 0.042 | 0.0010 |
| Promedio | | | | | | | 0.8315 | 0.0190 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M18

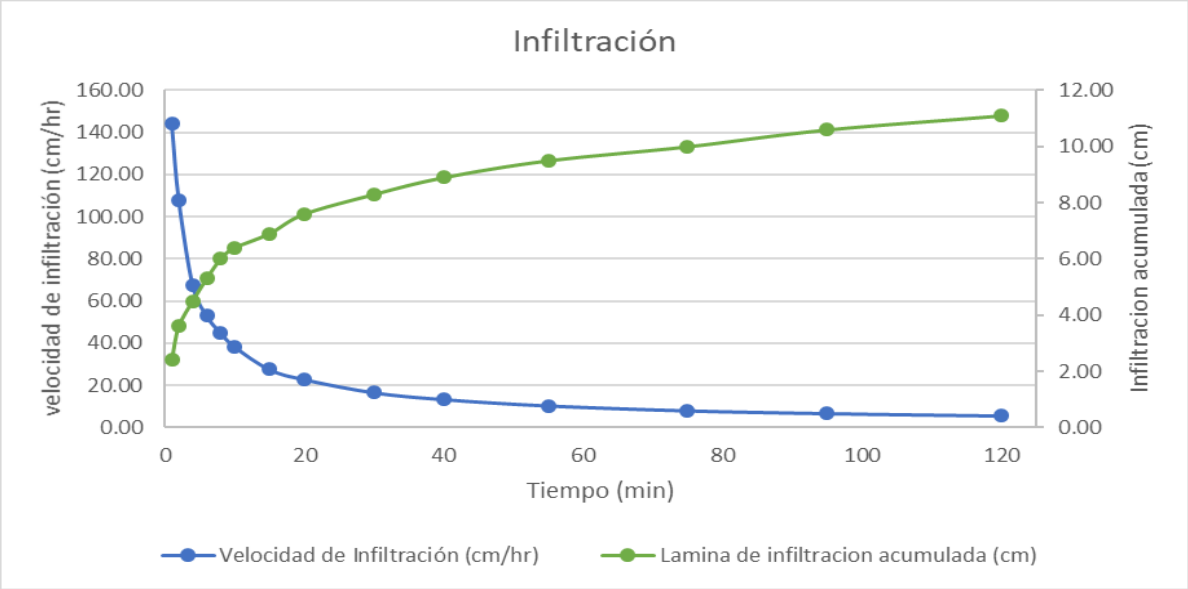
En la tabla anterior se presenta el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Debido a que el medidor está compuesto por dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,4 cm y un máximo de 2,40 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M18 muestran una variabilidad en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que representa la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, varía considerablemente a lo largo del tiempo, con valores que van desde 0,0420 cm/hr hasta 5,0940 cm/hr. Esto sugiere una diversidad en la capacidad de infiltración del suelo en diferentes momentos del ensayo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que indica la capacidad del suelo para transportar agua, también experimenta fluctuaciones, aunque en general mantiene una tendencia estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M18 es de 0,8315 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0190 cm/hr. Estos valores sugieren que, en promedio, el suelo de la muestra M18 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que implica una buena capacidad de drenaje. Sin embargo, la variabilidad en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo indica una posible heterogeneidad en la permeabilidad del suelo.

**Figura 25**

*Resultados de la muestra M18*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M18.

Se evidencia una velocidad mínima de infiltración de 5,55 cm/h y una velocidad máxima de 144,00 cm/h. Además, se registró un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 11 100 $cm^3$.

**Tabla 23**

*Datos de la muestra M19*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M19 | 1 | 8.5 | 5.9 | 2.6 | 2.6 | 156.00 | 5.518 | 0.1259 |
| M19 | 2 | 5.9 | 4.7 | 1.2 | 3.8 | 114.00 | 2.547 | 0.0581 |
| M19 | 4 | 4.7 | 3.8 | 0.9 | 4.7 | 70.50 | 0.955 | 0.0218 |
| M19 | 6 | 3.8 | 3.1 | 0.7 | 5.4 | 54.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M19 | 8 | 10 | 9.3 | 0.7 | 6.1 | 45.75 | 0.743 | 0.0170 |
| M19 | 10 | 9.3 | 8.6 | 0.7 | 6.8 | 40.80 | 0.743 | 0.0170 |
| M19 | 15 | 8.6 | 8.2 | 0.4 | 7.2 | 28.80 | 0.170 | 0.0039 |
| M19 | 20 | 8.2 | 7.7 | 0.5 | 7.7 | 23.10 | 0.212 | 0.0048 |
| M19 | 30 | 7.7 | 7.3 | 0.4 | 8.1 | 16.20 | 0.085 | 0.0019 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M19 | 40 | 7.3 | 6.9 | 0.4 | 8.5 | 12.75 | 0.085 | 0.0019 |
| M19 | 55 | 6.9 | 6.3 | 0.6 | 9.1 | 9.93 | 0.085 | 0.0019 |
| M19 | 75 | 6.3 | 5.8 | 0.5 | 9.6 | 7.68 | 0.053 | 0.0012 |
| M19 | 95 | 5.8 | 5.2 | 0.6 | 10.2 | 6.44 | 0.064 | 0.0015 |
| M19 | 120 | 5.2 | 4.7 | 0.5 | 10.7 | 5.35 | 0.042 | 0.0010 |
| Promedio | | | | | | | 0.8604 | 0.0196 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M19

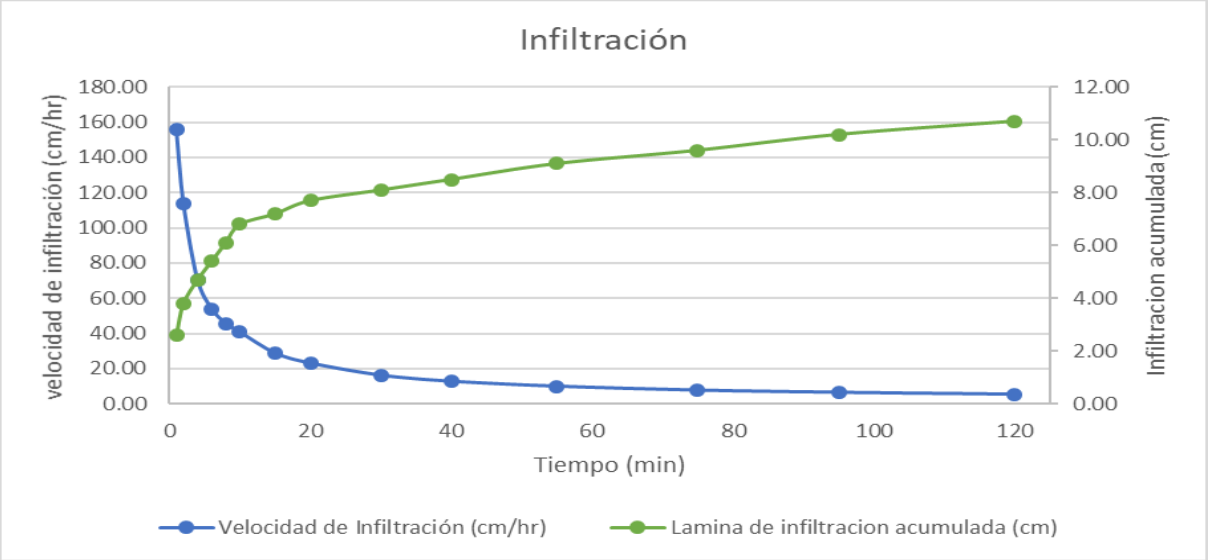
En la tabla previa se detalla el proceso de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,4 cm y un máximo de 2,60 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M19 exhiben una variabilidad en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, varía notablemente a lo largo del tiempo, con valores que oscilan entre 0,0420 cm/hr y 5,5180 cm/hr. Esto sugiere una diversidad en la capacidad de infiltración del suelo en diferentes momentos del ensayo. En cuanto a la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también muestra variaciones, aunque en general mantiene una tendencia estable.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M19 es de 0,8604 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0196 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M19 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua, lo que sugiere una buena capacidad de drenaje. Sin embargo, la variabilidad en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo señala una posible heterogeneidad en la permeabilidad del suelo.

**Figura 26**

*Resultados de la muestra M19*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M19.

Se ha observado una velocidad mínima de infiltración de 5,35 cm/h y una velocidad máxima de 156,00 cm/h. Donde, se registró un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 10 700 $cm^3$.

**Tabla 24**

*Datos de la muestra M20*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M20 | 1 | 9.4 | 7.2 | 2.2 | 2.2 | 132.00 | 4.669 | 0.1066 |
| M20 | 2 | 7.2 | 5.5 | 1.7 | 3.9 | 117.00 | 3.608 | 0.0823 |
| M20 | 4 | 5.5 | 4.2 | 1.3 | 5.2 | 78.00 | 1.380 | 0.0315 |
| M20 | 6 | 10 | 8.7 | 1.3 | 6.5 | 65.00 | 1.380 | 0.0315 |
| M20 | 8 | 8.7 | 7.4 | 1.3 | 7.8 | 58.50 | 1.380 | 0.0315 |
| M20 | 10 | 7.4 | 6.2 | 1.2 | 9 | 54.00 | 1.273 | 0.0291 |
| M20 | 15 | 6.2 | 5.4 | 0.8 | 9.8 | 39.20 | 0.340 | 0.0077 |
| M20 | 20 | 5.4 | 4.4 | 1 | 10.8 | 32.40 | 0.424 | 0.0097 |
| M20 | 30 | 4.4 | 3 | 1.4 | 12.2 | 24.40 | 0.297 | 0.0068 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M20 | 40 | 10 | 9.1 | 0.9 | 13.1 | 19.65 | 0.191 | 0.0044 |
| M20 | 55 | 9.1 | 7.9 | 1.2 | 14.3 | 15.60 | 0.170 | 0.0039 |
| M20 | 75 | 7.9 | 6.8 | 1.1 | 15.4 | 12.32 | 0.117 | 0.0027 |
| M20 | 95 | 6.8 | 5.5 | 1.3 | 16.7 | 10.55 | 0.138 | 0.0031 |
| M20 | 120 | 5.5 | 4.2 | 1.3 | 18 | 9.00 | 0.110 | 0.0025 |
| Promedio | | | | | | | 1.1055 | 0.0252 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M20

En la tabla anterior se detalla todo el proceso de crecimiento de la muestra, para el cual se consideran 14 mediciones, abarcando un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se registra como la diferencia entre estos dos anillos. Se observa que el nivel de agua infiltrada varía desde un mínimo de 0,8 cm hasta un máximo de 2,20 cm.

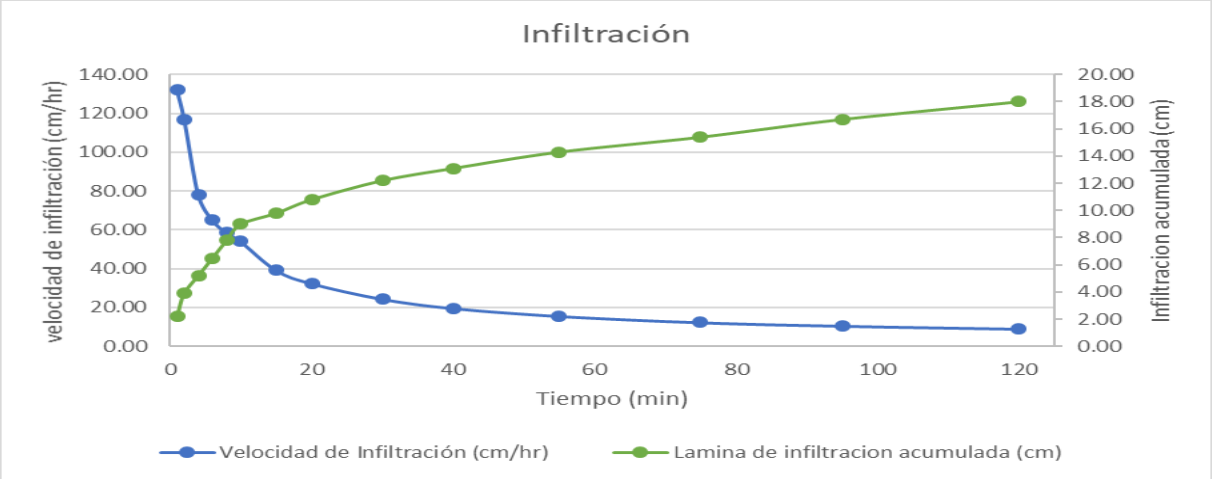
Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M20 revelan una variación en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, muestra una disminución gradual a medida que avanza el tiempo, partiendo de 4,6690 cm/hr en la primera hora hasta 0,1100 cm/hr en la última.

Esto sugiere una disminución en la capacidad de infiltración del suelo con el tiempo. Por otro lado, la conductividad hidráulica, que representa la capacidad del suelo para transportar agua, también disminuye con el tiempo, aunque en menor medida.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M20 es de 1,1055 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0252 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M20 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución en la tasa de infiltración a lo largo del tiempo sugiere una posible saturación o compactación del suelo, lo que podría afectar su capacidad de drenaje a largo plazo.

**Figura 27**

*Resultados de la muestra M20*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M20.

Se ha observado una velocidad mínima de infiltración de 9,00 cm/h y una velocidad máxima de 132,00 cm/h. Además, se ha registrado un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 18 000 cm³.

**Tabla 25**

*Datos de la muestra M21*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M21 | 1 | 9.4 | 7 | 2.4 | 2.4 | 144.00 | 5.094 | 0.1162 |
| M21 | 2 | 7 | 4.8 | 2.2 | 4.6 | 138.00 | 4.669 | 0.1066 |
| M21 | 4 | 4.8 | 2.6 | 2.2 | 6.8 | 102.00 | 2.335 | 0.0533 |
| M21 | 6 | 10 | 8.2 | 1.8 | 8.6 | 86.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M21 | 8 | 8.2 | 6.6 | 1.6 | 10.2 | 76.50 | 1.698 | 0.0387 |
| M21 | 10 | 6.6 | 4.8 | 1.8 | 12 | 72.00 | 1.910 | 0.0436 |
| M21 | 15 | 4.8 | 3.1 | 1.7 | 13.7 | 54.80 | 0.722 | 0.0165 |
| M21 | 20 | 10 | 8.9 | 1.1 | 14.8 | 44.40 | 0.467 | 0.0107 |
| M21 | 30 | 8.9 | 7.9 | 1 | 15.8 | 31.60 | 0.212 | 0.0048 |
| M21 | 40 | 7.9 | 6.9 | 1 | 16.8 | 25.20 | 0.212 | 0.0048 |
| M21 | 55 | 6.9 | 5.8 | 1.1 | 17.9 | 19.53 | 0.156 | 0.0036 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M21 | 75 | 5.8 | 4.9 | 0.9 | 18.8 | 15.04 | 0.096 | 0.0022 |
| M21 | 95 | 4.9 | 4.2 | 0.7 | 19.5 | 12.32 | 0.074 | 0.0017 |
| M21 | 120 | 4.2 | 3.6 | 0.6 | 20.1 | 10.05 | 0.051 | 0.0012 |
| Promedio | | | | | | | 1.4004 | 0.0320 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M21

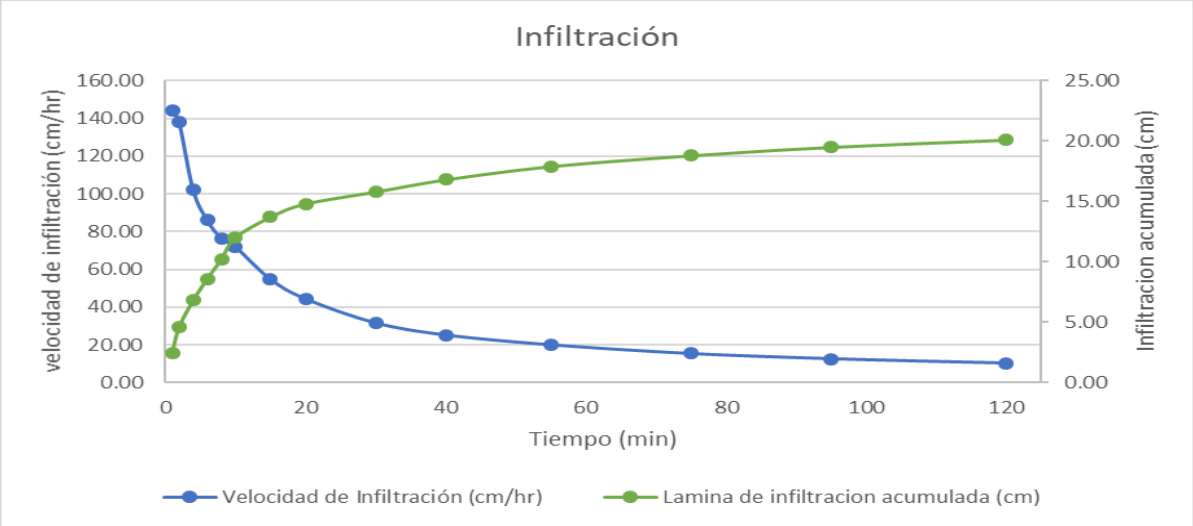
En la tabla anterior se detalla todo el proceso de crecimiento de la muestra, abarcando 14 mediciones en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se registra como la diferencia entre estos dos anillos. Se ha observado que el nivel de agua infiltrada varía desde un mínimo de 0,6 cm hasta un máximo de 2,40 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M21 muestran una disminución en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración, que indica la velocidad a la que el agua penetra en el suelo, disminuye gradualmente desde 5,0940 cm/hr en la primera hora hasta 0,0510 cm/hr en la última hora. Esto sugiere una reducción en la capacidad de infiltración del suelo a medida que pasa el tiempo. Además, la conductividad hidráulica, que refleja la capacidad del suelo para transportar agua, también disminuye a lo largo del tiempo. El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M21 es de 1,4004 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0320 cm/hr.

Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M21 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica con el tiempo sugiere una posible saturación del suelo, lo que podría afectar su capacidad de drenaje a largo plazo.

**Figura 28**

*Resultados de la muestra M21*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M21.

Se han registrado velocidades de infiltración que varían desde un mínimo de 10,25 cm/h hasta un máximo de 144,00 cm/h. Además, se ha observado un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 20 100 $cm^3$.

**Tabla 26**

*Datos de la muestra M22*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M22 | 1 | 9.4 | 6.3 | 3.1 | 3.1 | 186.00 | 6.579 | 0.1502 |
| M22 | 2 | 6.3 | 5 | 1.3 | 4.4 | 132.00 | 2.759 | 0.0630 |
| M22 | 4 | 5 | 3.8 | 1.2 | 5.6 | 84.00 | 1.273 | 0.0291 |
| M22 | 6 | 10 | 8.8 | 1.2 | 6.8 | 68.00 | 1.273 | 0.0291 |
| M22 | 8 | 8.8 | 7.5 | 1.3 | 8.1 | 60.75 | 1.380 | 0.0315 |
| M22 | 10 | 7.5 | 6.3 | 1.2 | 9.3 | 55.80 | 1.273 | 0.0291 |
| M22 | 15 | 6.3 | 5.2 | 1.1 | 10.4 | 41.60 | 0.467 | 0.0107 |
| M22 | 20 | 5.2 | 4.1 | 1.1 | 11.5 | 34.50 | 0.467 | 0.0107 |
| M22 | 30 | 4.1 | 2.6 | 1.5 | 13 | 26.00 | 0.318 | 0.0073 |
| M22 | 40 | 10 | 8.2 | 1.8 | 14.8 | 22.20 | 0.382 | 0.0087 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M22 | 55 | 8.2 | 7.1 | 1.1 | 15.9 | 17.35 | 0.156 | 0.0036 |
| M22 | 75 | 7.1 | 6 | 1.1 | 17 | 13.60 | 0.117 | 0.0027 |
| M22 | 95 | 6 | 5 | 1 | 18 | 11.37 | 0.106 | 0.0024 |
| M22 | 120 | 5 | 4.1 | 0.9 | 18.9 | 9.45 | 0.076 | 0.0017 |
| Promedio | | | | | | | 1.1876 | 0.0271 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M22

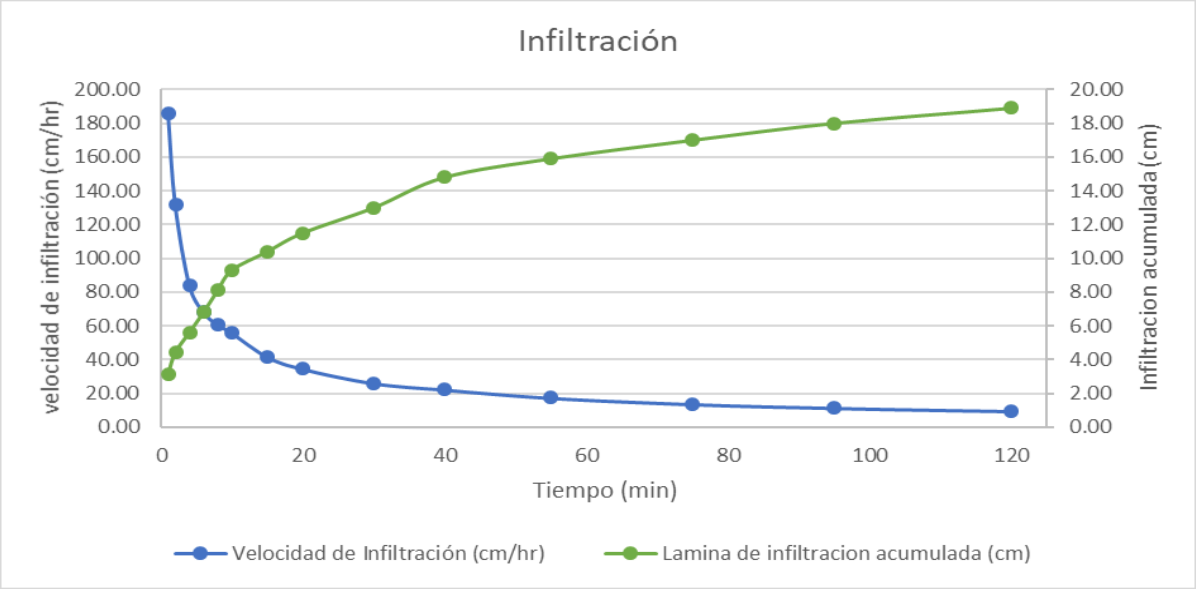
En la tabla anterior se presenta todo el proceso de crecimiento de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se registra mediante la diferencia entre ellos. Se ha observado que el nivel de agua infiltrada varía desde un mínimo de 0,9 cm hasta un máximo de 3,10 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M22 revelan una disminución gradual en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración inicial es alta, registrando 6,5790 cm/hr en la primera hora, pero disminuye progresivamente hasta alcanzar 0,0760 cm/hr en la hora 120. Este patrón sugiere una reducción en la capacidad del suelo para permitir el paso del agua a medida que transcurre el tiempo. Similarmente, la conductividad hidráulica también muestra una tendencia decreciente, partiendo de 0,1502 cm/hr en la primera hora y llegando a 0,0017 cm/hr en la hora 120.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M22 es de 1,1876 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0271 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M22 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución constante en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica con el tiempo sugiere una posible saturación del suelo y una limitación en su capacidad de drenaje a largo plazo.

**Figura 29**

*Resultados de la muestra M22*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M22.

Se ha observado una velocidad mínima de infiltración de 9,45 cm/h y una velocidad máxima de 186,00 cm/h. Además, se ha registrado un volumen máximo de agua infiltrada acumulada de 18 900 $cm^3$.

**Tabla 27**

*Datos de la muestra M23*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M23 | 1 | 9.3 | 5.8 | 3.5 | 3.5 | 210.00 | 7.428 | 0.1695 |
| M23 | 2 | 5.8 | 3.2 | 2.6 | 6.1 | 183.00 | 5.518 | 0.1259 |
| M23 | 4 | 3.2 | 1.4 | 1.8 | 7.9 | 118.50 | 1.910 | 0.0436 |
| M23 | 6 | 10 | 8.5 | 1.5 | 9.4 | 94.00 | 1.592 | 0.0363 |
| M23 | 8 | 8.5 | 7 | 1.5 | 10.9 | 81.75 | 1.592 | 0.0363 |
| M23 | 10 | 7 | 4.7 | 2.3 | 13.2 | 79.20 | 2.441 | 0.0557 |
| M23 | 15 | 4.7 | 2.2 | 2.5 | 15.7 | 62.80 | 1.061 | 0.0242 |
| M23 | 20 | 10 | 8.7 | 1.3 | 17 | 51.00 | 0.552 | 0.0126 |
| M23 | 30 | 8.7 | 7.4 | 1.3 | 18.3 | 36.60 | 0.276 | 0.0063 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M23 | 40 | 7.4 | 6.1 | 1.3 | 19.6 | 29.40 | 0.276 | 0.0063 |
| M23 | 55 | 6.1 | 5 | 1.1 | 20.7 | 22.58 | 0.156 | 0.0036 |
| M23 | 75 | 5 | 3.8 | 1.2 | 21.9 | 17.52 | 0.127 | 0.0029 |
| M23 | 95 | 3.8 | 2.8 | 1 | 22.9 | 14.46 | 0.106 | 0.0024 |
| M23 | 120 | 2.8 | 1.9 | 0.9 | 23.8 | 11.90 | 0.076 | 0.0017 |
| Promedio | | | | | | | 1.6508 | 0.0377 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M23

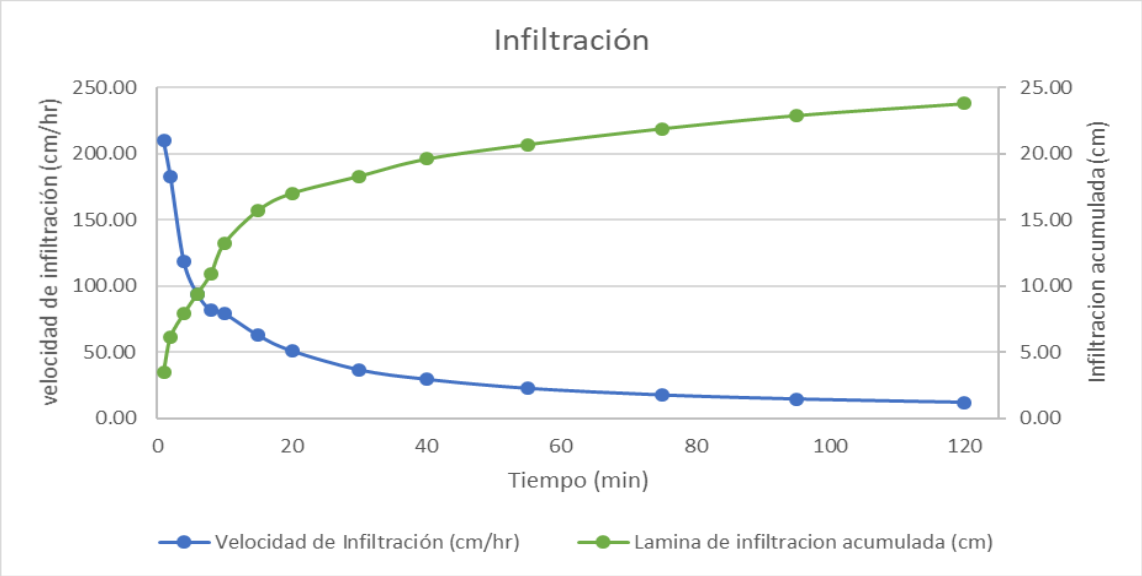
En la tabla anterior se observa toda la fase de crecimiento de la muestra, para la que se consideran 14 mediciones, en un intervalo de tiempo acumulado de 120 min. Como el medidor es de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre los dos anillos. El nivel de agua infiltrada mínimo es de 0,9 cm y el máximo de 3,50 cm.

Los datos del ensayo de infiltración para la muestra M23 muestran una disminución progresiva en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. La tasa de infiltración inicial es alta, registrando 7,4280 cm/hr en la primera hora, pero disminuye significativamente a lo largo del tiempo, alcanzando 0,0760 cm/hr en la hora 120. Este patrón indica una reducción en la capacidad del suelo para permitir el paso del agua con el tiempo. La conductividad hidráulica sigue una tendencia similar, disminuyendo de 0,1695 cm/hr en la primera hora a 0,0017 cm/hr en la hora 120. El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M23 es de 1,6508 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0377 cm/hr.

Estos valores sugieren que, en promedio, el suelo de la muestra M23 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución continua en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo indica una posible saturación del suelo y una limitación en su capacidad de drenaje a largo plazo.

**Figura 30**

*Resultados de la muestra M23*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M23.

Se observó una velocidad mínima de infiltración de 11,90 cm/h y una velocidad máxima de 210,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada fue de 23 800 cm.

**Tabla 28**

*Datos de la muestra M24*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M24 | 1 | 9.8 | 6.8 | 3 | 3 | 180.00 | 6.367 | 0.1453 |
| M24 | 2 | 6.8 | 4 | 2.8 | 5.8 | 174.00 | 5.943 | 0.1356 |
| M24 | 4 | 10 | 7.3 | 2.7 | 8.5 | 127.50 | 2.865 | 0.0654 |
| M24 | 6 | 7.3 | 5.4 | 1.9 | 10.4 | 104.00 | 2.016 | 0.0460 |
| M24 | 8 | 5.4 | 3.6 | 1.8 | 12.2 | 91.50 | 1.910 | 0.0436 |
| M24 | 10 | 3.6 | 2 | 1.6 | 13.8 | 82.80 | 1.698 | 0.0387 |
| M24 | 15 | 10 | 8.6 | 1.4 | 15.2 | 60.80 | 0.594 | 0.0136 |
| M24 | 20 | 8.6 | 6.8 | 1.8 | 17 | 51.00 | 0.764 | 0.0174 |
| M24 | 30 | 6.8 | 5.2 | 1.6 | 18.6 | 37.20 | 0.340 | 0.0077 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M24 | 40 | 5.2 | 4 | 1.2 | 19.8 | 29.70 | 0.255 | 0.0058 |
| M24 | 55 | 10 | 9 | 1 | 20.8 | 22.69 | 0.141 | 0.0032 |
| M24 | 75 | 9 | 7.5 | 1.5 | 22.3 | 17.84 | 0.159 | 0.0036 |
| M24 | 95 | 7.5 | 6.2 | 1.3 | 23.6 | 14.91 | 0.138 | 0.0031 |
| M24 | 120 | 6.2 | 5 | 1.2 | 24.8 | 12.40 | 0.102 | 0.0023 |
| Promedio | | | | | | | 1.6637 | 0.0380 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M24

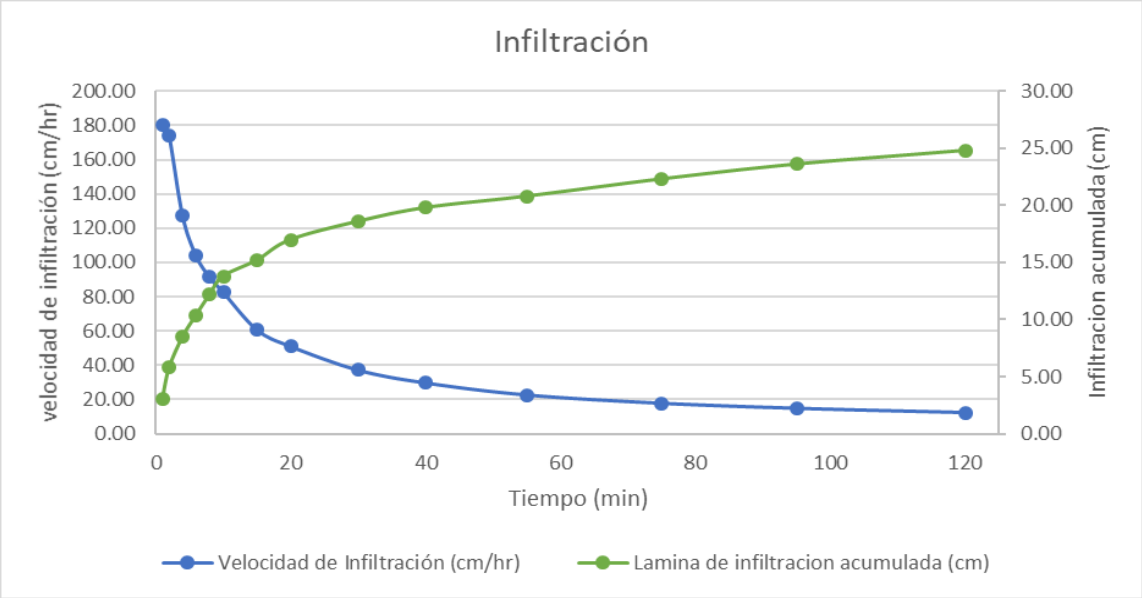
En la tabla anterior se detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, que incluye 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide por la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 1,0 cm y un máximo de 3,00 cm.

Los datos del ensayo de infiltración para la muestra M24 revelan una disminución gradual en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. Inicialmente, la tasa de infiltración es relativamente alta, registrando 6,3670 cm/hr en la primera hora, y disminuye a 0,1020 cm/hr en la hora 120. Esta disminución indica una reducción en la capacidad del suelo para permitir el paso del agua a lo largo del tiempo. La conductividad hidráulica sigue una tendencia similar, disminuyendo de 0,1453 cm/hr en la primera hora a 0,0023 cm/hr en la hora 120.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M24 es de 1,6637 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0380 cm/hr. Estos valores sugieren que, en promedio, el suelo de la muestra M24 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución continua en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo indica una posible saturación del suelo y una limitación en su capacidad de drenaje a largo plazo.

**Figura 31**

*Resultados de la muestra M24*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M24.

**Principio del formulario**

Se visualizó una velocidad mínima de infiltración de 12,40 cm/h y una velocidad máxima de 180,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada alcanzó los 24 800 cm.

**Tabla 29**

*Datos de la muestra M25*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M25 | 1 | 9.8 | 7.7 | 2.1 | 2.1 | 126.00 | 4.457 | 0.1017 |
| M25 | 2 | 7.7 | 6.7 | 1 | 3.1 | 93.00 | 2.122 | 0.0484 |
| M25 | 4 | 6.7 | 6.2 | 0.5 | 3.6 | 54.00 | 0.531 | 0.0121 |
| M25 | 6 | 6.2 | 5.6 | 0.6 | 4.2 | 42.00 | 0.637 | 0.0145 |
| M25 | 8 | 5.6 | 5.1 | 0.5 | 4.7 | 35.25 | 0.531 | 0.0121 |
| M25 | 10 | 5.1 | 4.5 | 0.6 | 5.3 | 31.80 | 0.637 | 0.0145 |
| M25 | 15 | 4.5 | 3.9 | 0.6 | 5.9 | 23.60 | 0.255 | 0.0058 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M25 | 20 | 3.9 | 3.5 | 0.4 | 6.3 | 18.90 | 0.170 | 0.0039 |
| M25 | 30 | 10 | 9.5 | 0.5 | 6.8 | 13.60 | 0.106 | 0.0024 |
| M25 | 40 | 9.5 | 9 | 0.5 | 7.3 | 10.95 | 0.106 | 0.0024 |
| M25 | 55 | 9 | 8.5 | 0.5 | 7.8 | 8.51 | 0.071 | 0.0016 |
| M25 | 75 | 8.5 | 8 | 0.5 | 8.3 | 6.64 | 0.053 | 0.0012 |
| M25 | 95 | 8 | 7.6 | 0.4 | 8.7 | 5.49 | 0.042 | 0.0010 |
| M25 | 120 | 7.6 | 7 | 0.6 | 9.3 | 4.65 | 0.051 | 0.0012 |
| Promedio | | | | | | | 0.6978 | 0.0159 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M25

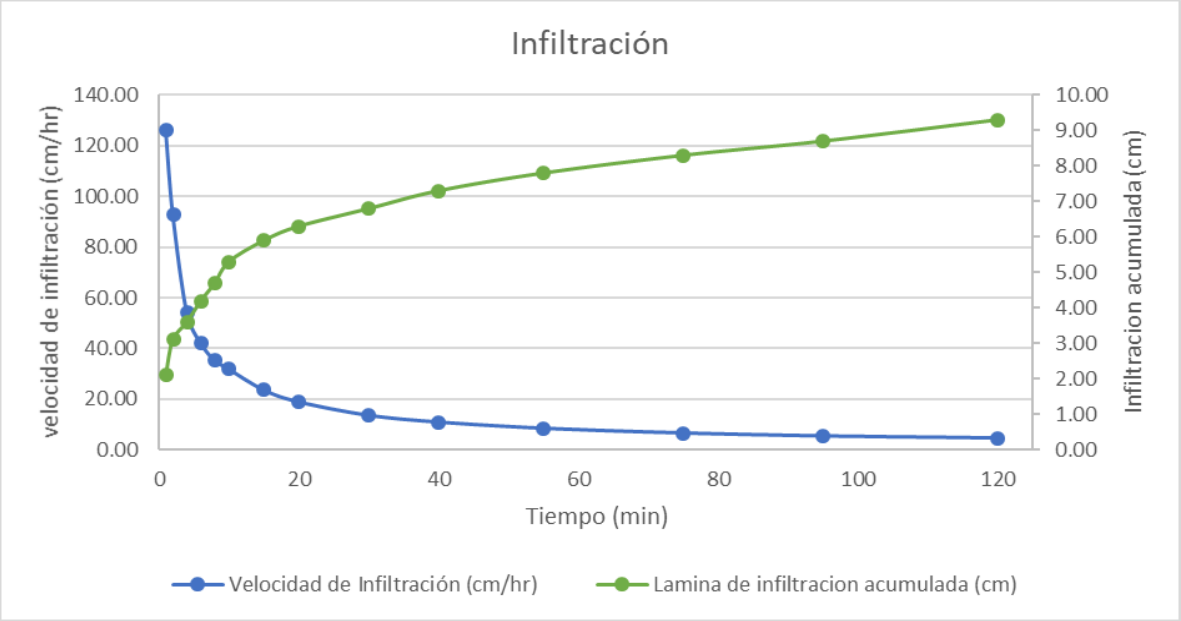
En la tabla anterior se registra todo el proceso de crecimiento de la muestra, para el cual se tomaron 14 mediciones en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Se observa que el nivel mínimo de infiltración de agua es de 0,4 cm, mientras que el máximo alcanza los 2,10 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M25 muestran una disminución en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. Inicialmente, la tasa de infiltración es relativamente alta, con 4,4570 cm/hr en la primera hora, y disminuye gradualmente a 0,0510 cm/hr en la hora 120. Esta reducción indica una disminución en la capacidad del suelo para permitir el paso del agua a lo largo del tiempo. La conductividad hidráulica sigue una tendencia similar, disminuyendo de 0,1017 cm/hr en la primera hora a 0,0012 cm/hr en la hora 120.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M25 es de 0,6978 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0159 cm/hr. Estos valores sugieren que, en promedio, el suelo de la muestra M25 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución continua en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo indica una posible saturación del suelo y una limitación en su capacidad de drenaje a largo plazo.

**Figura 32**

*Resultados de la muestra M25*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M25.

La velocidad mínima de infiltración es de 4,65 cm/h, mientras que la máxima es de 126,00 cm/h. El volumen máximo de agua infiltrada acumulada es de 9 300 $cm^3$.

**Tabla 30**

*Datos de la muestra M26*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M26 | 1 | 9.8 | 7.1 | 2.7 | 2.7 | 162.00 | 5.730 | 0.1308 |
| M26 | 2 | 7.1 | 5 | 2.1 | 4.8 | 144.00 | 4.457 | 0.1017 |
| M26 | 4 | 5 | 3.6 | 1.4 | 6.2 | 93.00 | 1.486 | 0.0339 |
| M26 | 6 | 3.6 | 2.2 | 1.4 | 7.6 | 76.00 | 1.486 | 0.0339 |
| M26 | 8 | 11 | 9.6 | 1.4 | 9 | 67.50 | 1.486 | 0.0339 |
| M26 | 10 | 9.6 | 8.4 | 1.2 | 10.2 | 61.20 | 1.273 | 0.0291 |
| M26 | 15 | 8.4 | 7.2 | 1.2 | 11.4 | 45.60 | 0.509 | 0.0116 |
| M26 | 20 | 7.2 | 6.1 | 1.1 | 12.5 | 37.50 | 0.467 | 0.0107 |
| M26 | 30 | 6.1 | 5 | 1.1 | 13.6 | 27.20 | 0.233 | 0.0053 |
| M26 | 40 | 5 | 4 | 1 | 14.6 | 21.90 | 0.212 | 0.0048 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M26 | 55 | 10 | 8.8 | 1.2 | 15.8 | 17.24 | 0.170 | 0.0039 |
| M26 | 75 | 8.8 | 7.5 | 1.3 | 17.1 | 13.68 | 0.138 | 0.0031 |
| M26 | 95 | 7.5 | 6.2 | 1.3 | 18.4 | 11.62 | 0.138 | 0.0031 |
| M26 | 120 | 6.2 | 5.6 | 0.6 | 19 | 9.50 | 0.051 | 0.0012 |
| Promedio | | | | | | | 1.2740 | 0.0291 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M26

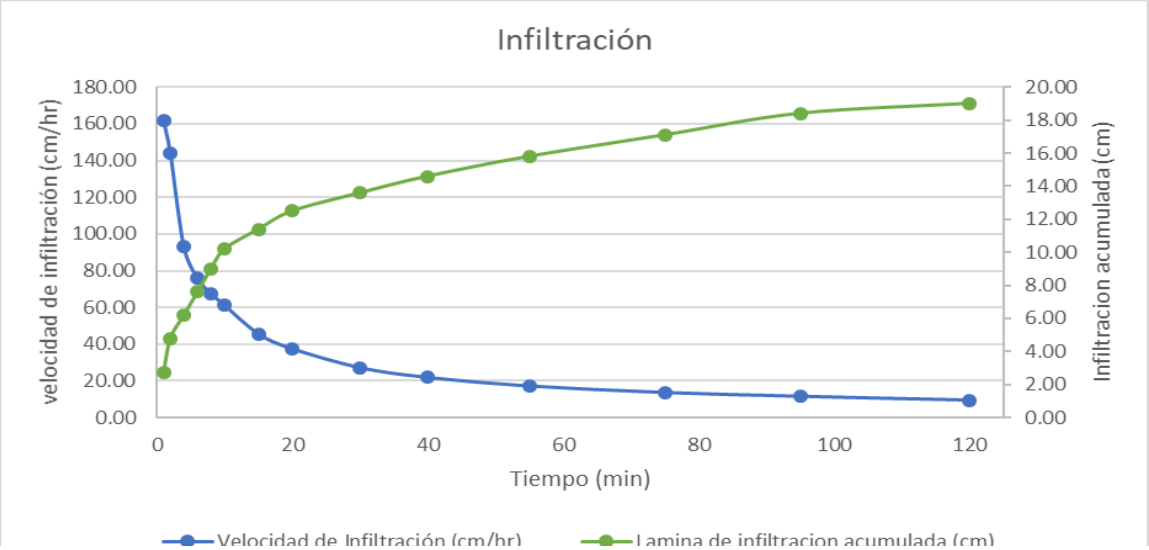
La tabla anterior detalla el proceso completo de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor tiene dos anillos. El nivel de agua se determina mediante la diferencia entre estos anillos. Se observó un nivel mínimo de infiltración de agua de 0,6 cm, mientras que el máximo alcanzó los 2,70 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M26 revelan una tasa de infiltración y una conductividad hidráulica que disminuyen a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. En la primera hora, la tasa de infiltración es relativamente alta, con 5,7300 cm/hr, lo que indica una buena capacidad del suelo para permitir el paso del agua. Sin embargo, esta tasa disminuye progresivamente a lo largo del tiempo, alcanzando 0,0510 cm/hr en la hora 120. Esta reducción sugiere una posible saturación del suelo y una disminución en su capacidad para drenar el agua.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M26 es de 1,2740 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0291 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M26 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución continua en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo sugiere una limitación en la capacidad de drenaje del suelo a largo plazo.

**Figura 33**

*Resultados de la muestra M26*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M26.

Se observó una tasa mínima de infiltración de 9,50 cm/h y una máxima de 162,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada alcanzó los 19 000 $cm^3$.

**Tabla 31**

*Datos de la muestra M27*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M27 | 1 | 9.8 | 8.1 | 1.7 | 1.7 | 102.00 | 3.608 | 0.0823 |
| M27 | 2 | 8.1 | 6.7 | 1.4 | 3.1 | 93.00 | 2.971 | 0.0678 |
| M27 | 4 | 6.7 | 5.6 | 1.1 | 4.2 | 63.00 | 1.167 | 0.0266 |
| M27 | 6 | 5.6 | 4.5 | 1.1 | 5.3 | 53.00 | 1.167 | 0.0266 |
| M27 | 8 | 4.5 | 3.6 | 0.9 | 6.2 | 46.50 | 0.955 | 0.0218 |
| M27 | 10 | 11 | 10.2 | 0.8 | 7 | 42.00 | 0.849 | 0.0194 |
| M27 | 15 | 10.2 | 9.2 | 1 | 8 | 32.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M27 | 20 | 9.2 | 8.5 | 0.7 | 8.7 | 26.10 | 0.297 | 0.0068 |
| M27 | 30 | 8.5 | 7.7 | 0.8 | 9.5 | 19.00 | 0.170 | 0.0039 |
| M27 | 40 | 7.7 | 7 | 0.7 | 10.2 | 15.30 | 0.149 | 0.0034 |
| M27 | 55 | 7 | 6.3 | 0.7 | 10.9 | 11.89 | 0.099 | 0.0023 |
| M27 | 75 | 6.3 | 5.7 | 0.6 | 11.5 | 9.20 | 0.064 | 0.0015 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M27 | 95 | 5.7 | 5 | 0.7 | 12.2 | 7.71 | 0.074 | 0.0017 |
| M27 | 120 | 5 | 4.4 | 0.6 | 12.8 | 6.40 | 0.051 | 0.0012 |
| Promedio | | | | | | | 0.8604 | 0.0196 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M27

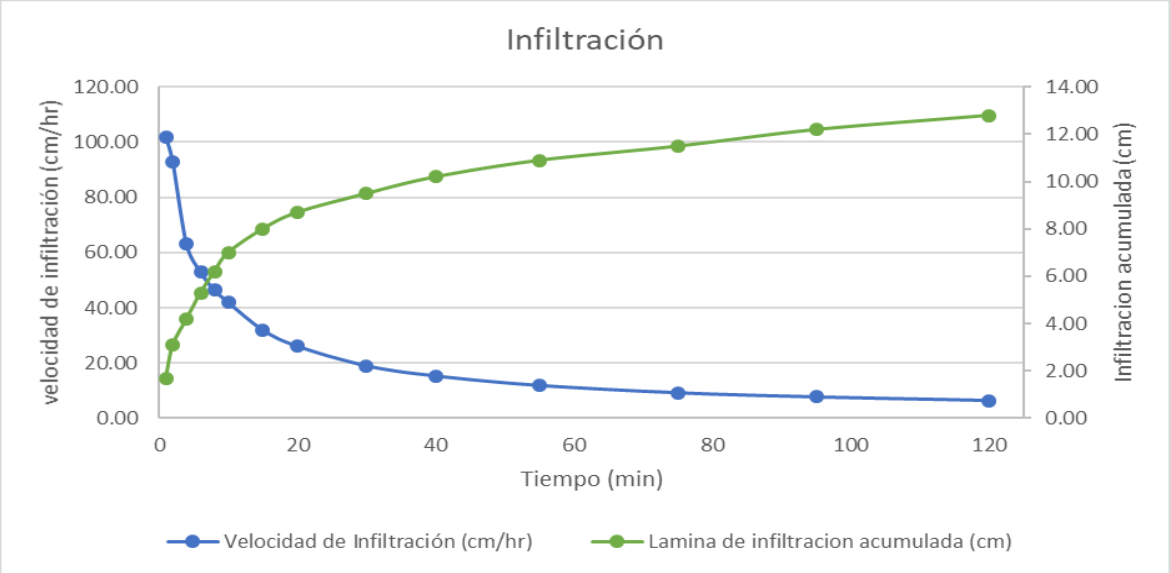
En la tabla anterior se detalla el proceso de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,6 cm y un máximo de 1,70 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M27 muestran una disminución gradual en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. En la primera hora, la tasa de infiltración es de 3,6080 cm/hr, lo que indica una buena capacidad inicial del suelo para permitir el paso del agua. Sin embargo, esta tasa disminuye progresivamente a lo largo del tiempo, alcanzando 0,0510 cm/hr en la hora 120. Este descenso sugiere una posible saturación del suelo y una reducción en su capacidad para drenar el agua.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M27 es de 0,8604 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0196 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M27 tiene una capacidad moderada para infiltrar y transportar agua. Sin embargo, la disminución continua en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a lo largo del tiempo sugiere una posible limitación en la capacidad de drenaje del suelo a largo plazo.

**Figura 34**

*Resultados de la muestra M27*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M27.

Se evidenció una velocidad mínima de infiltración de 6,40 cm/h y una velocidad máxima de 102,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua infiltrada alcanzó los 12 800 $cm^3$.

**Tabla 32**

*Datos de la muestra M28*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M28 | 1 | 9.8 | 8.1 | 1.7 | 1.7 | 102.00 | 3.608 | 0.0823 |
| M28 | 2 | 8.1 | 7.4 | 0.7 | 2.4 | 72.00 | 1.486 | 0.0339 |
| M28 | 4 | 7.4 | 7 | 0.4 | 2.8 | 42.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M28 | 6 | 7 | 6.6 | 0.4 | 3.2 | 32.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M28 | 8 | 6.6 | 6.2 | 0.4 | 3.6 | 27.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M28 | 10 | 6.2 | 5.8 | 0.4 | 4 | 24.00 | 0.424 | 0.0097 |
| M28 | 15 | 5.8 | 5.5 | 0.3 | 4.3 | 17.20 | 0.127 | 0.0029 |
| M28 | 20 | 5.5 | 5.2 | 0.3 | 4.6 | 13.80 | 0.127 | 0.0029 |
| M28 | 30 | 5.2 | 4.9 | 0.3 | 4.9 | 9.80 | 0.064 | 0.0015 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M28 | 40 | 4.9 | 4.6 | 0.3 | 5.2 | 7.80 | 0.064 | 0.0015 |
| M28 | 55 | 10 | 9.7 | 0.3 | 5.5 | 6.00 | 0.042 | 0.0010 |
| M28 | 75 | 9.7 | 9.4 | 0.3 | 5.8 | 4.64 | 0.032 | 0.0007 |
| M28 | 95 | 9.4 | 9.2 | 0.2 | 6 | 3.79 | 0.021 | 0.0005 |
| M28 | 120 | 9.2 | 8.9 | 0.3 | 6.3 | 3.15 | 0.025 | 0.0006 |
| Promedio | | | | | | | 0.5209 | 0.0119 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M28

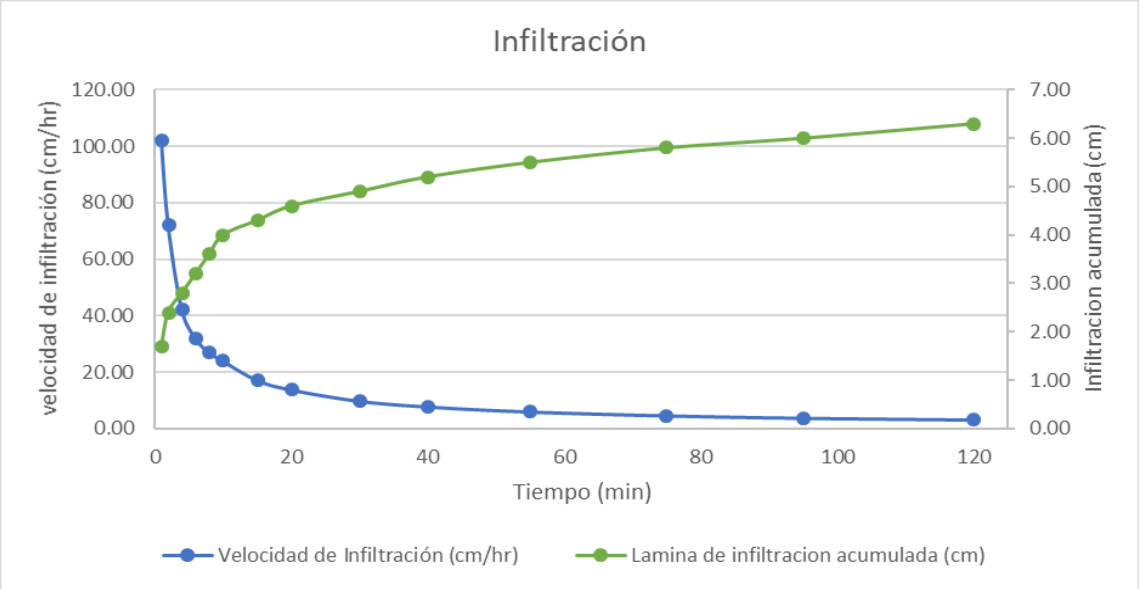
La tabla anterior muestra el desarrollo completo de la muestra, abarcando un total de 14 mediciones realizadas en un intervalo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, la medición del nivel de agua se realiza tomando la diferencia entre estos dos anillos. Se observa que el nivel mínimo de infiltración de agua es de 0,2 cm, mientras que el máximo alcanza los 1,70 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M28 muestran una disminución significativa en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que aumenta el tiempo acumulado en horas. Inicialmente, en la primera hora, la tasa de infiltración es de 3,6080 cm/hr, lo que indica una buena capacidad inicial del suelo para permitir el paso del agua. Sin embargo, esta tasa disminuye drásticamente a lo largo del tiempo, alcanzando solo 0,0250 cm/hr en la hora 120. Este descenso pronunciado sugiere una saturación rápida del suelo y una disminución severa en su capacidad para drenar el agua.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M28 es de 0,5209 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0119 cm/hr. Estos valores indican que, en promedio, el suelo de la muestra M28 tiene una capacidad limitada para infiltrar y transportar agua, lo que puede deberse a la presencia de capas impermeables o una estructura del suelo que dificulta el flujo del agua. Esta baja conductividad hidráulica sugiere una limitación significativa en la capacidad de drenaje del suelo a largo plazo.

**Figura 35**

*Resultados de la muestra M28*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M28.

Se observó una velocidad mínima de penetración de 3,15 cm/h y una máxima de 102,00 cm/h. Además, el volumen máximo acumulado de agua de infiltración fue de 6300 centímetros cúbicos.

**Tabla 33**

*Datos de la muestra M29*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M29 | 1 | 9.8 | 8.3 | 1.5 | 1.5 | 90.00 | 3.184 | 0.0727 |
| M29 | 2 | 8.3 | 7.8 | 0.5 | 2 | 60.00 | 1.061 | 0.0242 |
| M29 | 4 | 7.8 | 7.3 | 0.5 | 2.5 | 37.50 | 0.531 | 0.0121 |
| M29 | 6 | 7.3 | 6.8 | 0.5 | 3 | 30.00 | 0.531 | 0.0121 |
| M29 | 8 | 6.8 | 6.3 | 0.5 | 3.5 | 26.25 | 0.531 | 0.0121 |
| M29 | 10 | 6.3 | 6 | 0.3 | 3.8 | 22.80 | 0.318 | 0.0073 |
| M29 | 15 | 6 | 5.8 | 0.2 | 4 | 16.00 | 0.085 | 0.0019 |
| M29 | 20 | 5.8 | 5.6 | 0.2 | 4.2 | 12.60 | 0.085 | 0.0019 |
| M29 | 30 | 5.6 | 5.2 | 0.4 | 4.6 | 9.20 | 0.085 | 0.0019 |
| M29 | 40 | 5.2 | 4.9 | 0.3 | 4.9 | 7.35 | 0.064 | 0.0015 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M29 | 55 | 4.9 | 4.7 | 0.2 | 5.1 | 5.56 | 0.028 | 0.0006 |
| M29 | 75 | 4.7 | 4.5 | 0.2 | 5.3 | 4.24 | 0.021 | 0.0005 |
| M29 | 95 | 4.5 | 4.3 | 0.2 | 5.5 | 3.47 | 0.021 | 0.0005 |
| M29 | 120 | 4.3 | 4.1 | 0.2 | 5.7 | 2.85 | 0.017 | 0.0004 |
| Promedio | | | | | | | 0.4687 | 0.0107 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M29

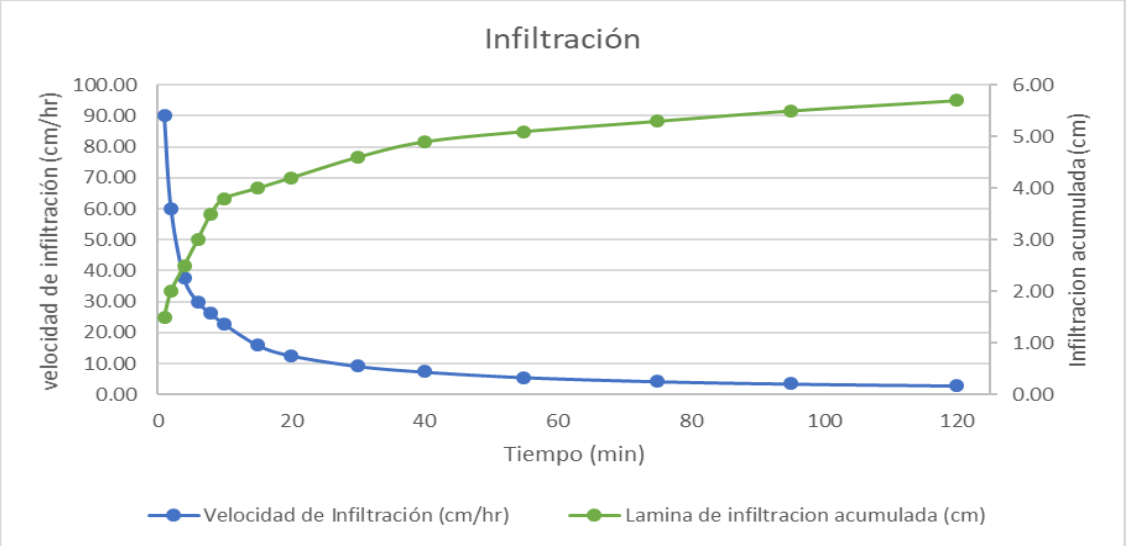
En la tabla anterior se detalla el proceso de crecimiento de la muestra, con 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Dado que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se mide mediante la diferencia entre estos dos anillos. Durante las mediciones, se registró un nivel mínimo de agua infiltrada de 0,2 cm y un máximo de 1,50 cm.

Los datos del ensayo de infiltración para la muestra M29 revelan una tendencia decreciente en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que transcurre el tiempo acumulado. Inicialmente, en la primera hora, la tasa de infiltración es relativamente alta, con un valor de 3,1840 cm/hr, lo que indica una capacidad inicial del suelo para permitir el paso del agua. Sin embargo, esta tasa disminuye significativamente a lo largo del tiempo, alcanzando solo 0,0170 cm/hr en la hora 120. Esta disminución indica una saturación progresiva del suelo y una reducción en su capacidad de drenaje con el tiempo.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M29 es de 0,4687 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0107 cm/hr. Estos valores promedio reflejan una capacidad relativamente baja del suelo para infiltrar y transportar agua. La conductividad hidráulica promedio indica que el suelo tiene dificultades para permitir el flujo del agua, lo que puede ser atribuido a la presencia de capas compactadas o a una estructura del suelo que limita el movimiento del agua a través de él. En conjunto, estos resultados sugieren que el suelo de la muestra M29 puede presentar desafíos en términos de drenaje y retención de agua.

**Figura 36**

*Resultados de la muestra M29*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra m29.

Se observaron velocidades de infiltración que variaron desde un mínimo de 2,85 cm/h hasta un máximo de 90,00 cm/h. Además, se registró un volumen máximo acumulado de agua infiltrada de 5700 $cm^3$.

**Tabla 34**

*Datos de la muestra M30*

| Muestra | Tiempo acumulado (m) | Nivel de agua inicio (cm) | Nivel de agua final (cm) | Infiltración (cm) | Infiltración Acumulado (cm) | Velocidad de infiltración (cm/hr) | Tasa de infiltración (cm/hr) | Conductividad hidráulica (cm/hr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M30 | 1 | 9.8 | 7.4 | 2.4 | 2.4 | 144.00 | 5.094 | 0.1162 |
| M30 | 2 | 7.4 | 5.8 | 1.6 | 4 | 120.00 | 3.396 | 0.0775 |
| M30 | 4 | 5.8 | 5.1 | 0.7 | 4.7 | 70.50 | 0.743 | 0.0170 |
| M30 | 6 | 5.1 | 4.4 | 0.7 | 5.4 | 54.00 | 0.743 | 0.0170 |
| M30 | 8 | 4.4 | 3.8 | 0.6 | 6 | 45.00 | 0.637 | 0.0145 |
| M30 | 10 | 3.8 | 3.3 | 0.5 | 6.5 | 39.00 | 0.531 | 0.0121 |
| M30 | 15 | 10.5 | 10 | 0.5 | 7 | 28.00 | 0.212 | 0.0048 |
| M30 | 20 | 10 | 9.5 | 0.5 | 7.5 | 22.50 | 0.212 | 0.0048 |
| M30 | 30 | 9.5 | 9 | 0.5 | 8 | 16.00 | 0.106 | 0.0024 |
| M30 | 40 | 9 | 8.6 | 0.4 | 8.4 | 12.60 | 0.085 | 0.0019 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M30 | 55 | 8.6 | 8.2 | 0.4 | 8.8 | 9.60 | 0.057 | 0.0013 |
| M30 | 75 | 8.2 | 7.8 | 0.4 | 9.2 | 7.36 | 0.042 | 0.0010 |
| M30 | 95 | 7.8 | 7.5 | 0.3 | 9.5 | 6.00 | 0.032 | 0.0007 |
| M30 | 120 | 7.5 | 7.2 | 0.3 | 9.8 | 4.90 | 0.025 | 0.0006 |
| Promedio | | | | | | | 0.8511 | 0.0194 |

**Nota.** Se muestra resultados y análisis del ensayo de infiltración de la muestra M30

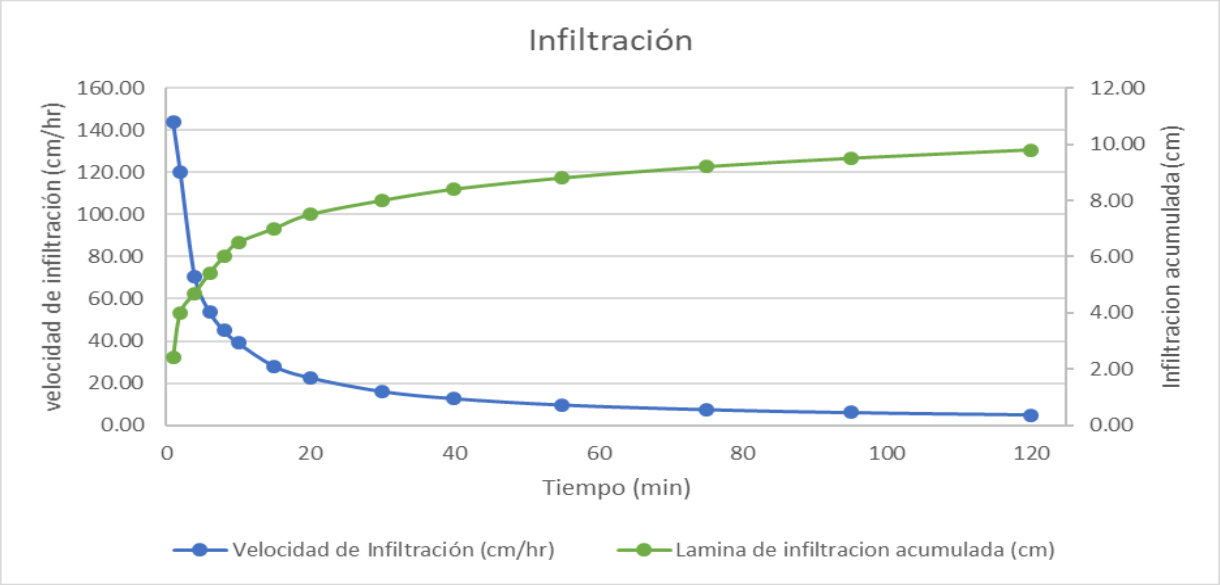
La tabla presenta el proceso de crecimiento de la muestra, con un total de 14 mediciones realizadas en un intervalo de tiempo acumulado de 120 minutos. Debido a que el medidor consta de dos anillos, el nivel de agua se registra como la diferencia entre estos dos anillos. El nivel mínimo de agua infiltrada es de 0,3 cm, mientras que el máximo es de 2,40 cm.

Los resultados del ensayo de infiltración para la muestra M30 muestran una disminución progresiva en la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica a medida que avanza el tiempo acumulado. Inicialmente, en la primera hora, la tasa de infiltración es relativamente alta, alcanzando los 5,0940 cm/hr, lo que sugiere una buena capacidad inicial del suelo para permitir el paso del agua. Sin embargo, esta tasa disminuye gradualmente a lo largo del tiempo, llegando a solo 0,0250 cm/hr en la hora 120. Esta reducción indica una saturación gradual del suelo y una disminución en su capacidad para drenar el agua con el tiempo.

El promedio de la tasa de infiltración para la muestra M30 es de 0,8511 cm/hr, mientras que el promedio de la conductividad hidráulica es de 0,0194 cm/hr. Estos valores promedio reflejan una capacidad moderada del suelo para infiltrar y transportar agua, aunque con una tendencia a disminuir a lo largo del tiempo. La conductividad hidráulica promedio sugiere que el suelo tiene una capacidad razonable para permitir el flujo del agua, pero puede tener algunas limitaciones en términos de retención de agua o drenaje. En resumen, los resultados indican que el suelo de la muestra M30 tiene una capacidad razonable para el movimiento del agua, pero puede presentar desafíos en términos de retención y drenaje a largo plazo.

**Figura 37**

*Resultados de la muestra M30*




**Nota.** En esta figura se muestra los resultados de la muestra M30

La velocidad de penetración mínima es de 4,90 cm/h y la máxima es de 144,00 cm/h. El volumen máximo de agua de infiltración acumulada es de 9800 centímetros cúbicos.

Para determinar la recarga hídrica del ecosistema bofedal se utilizó el método de cuantificación del beneficio hidrológico de las intervenciones en cuencas (CUBHIC 2.0 última versión): Recarga hídrica del ecosistema bofedal;

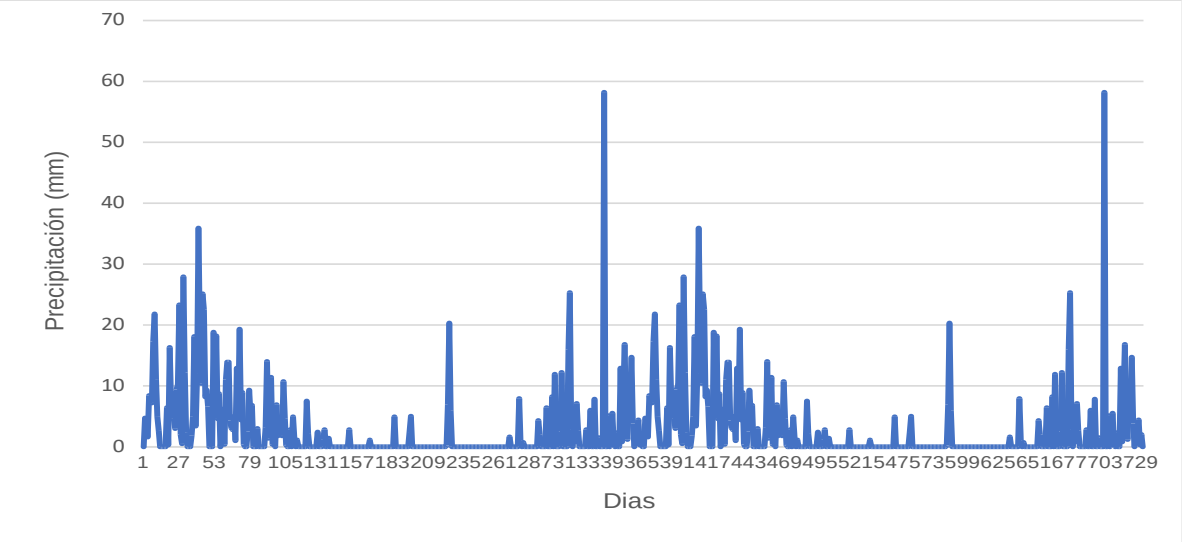
El bofedal abarca una extensión de 68 hectáreas y se encuentra ubicado en la parte alta del sector de Rontoccocha. En esta área, las especies dominantes incluyen *Cuatrecasasiella isemii*, *Trichophorum* y *Werneria pygmaea*, las cuales pertenecen a las familias *Asteraceae* y *Cyperaceae*. Además de estas especies, el ecosistema también alberga líquenes, musgos y otras especies vegetales. La presencia de materia orgánica en descomposición permite una mejor interceptación de las precipitaciones y posterior infiltración en el suelo, lo que se traduce en una mayor y mejor recarga del acuífero.

Para calcular el caudal anual, se utilizó el dato de precipitación media diaria anual de la estación San Antonio, que fue de 1045,8 mm/año. Además, se emplearon los siguientes parámetros: el número de curva (CN) fue de 73, el índice de área foliar (LAI) fue de 1,5

m²/m², la evapotranspiración verdadera fue de 363,7 mm/año y la evapotranspiración verdadera promedio (ETo) fue de 0,99 mm/día. Con estos datos, se puede realizar el cálculo del caudal anual.

**Figura 38**

*Datos de precipitación*




**Nota.** La figura muestra precipitación diaria estación de San Antonio.

Los parámetros que ejercen un impacto directo en la recarga hídrica son el escurrimiento y la infiltración, los cuales contribuyen al aumento de las aguas superficiales y subterráneas. En un ecosistema de humedal que abarca 68 hectáreas, se registra un escurrimiento de 623,16 mm/ha/año, lo que equivale a una producción anual de 311 583 metros cúbicos. Además, se observa un volumen de percolación de 554,28 mm/año, generando 277 143 metros cúbicos anuales. En conjunto, para esta área de humedal, la oferta total de agua alcanza los 588 726 metros cúbicos al año. Estos datos se detallan en la Tabla 39 y se presentan gráficamente en las Figuras 39 y 40.

**Tabla 35**

*Lámina de agua y volumen en bofedales*

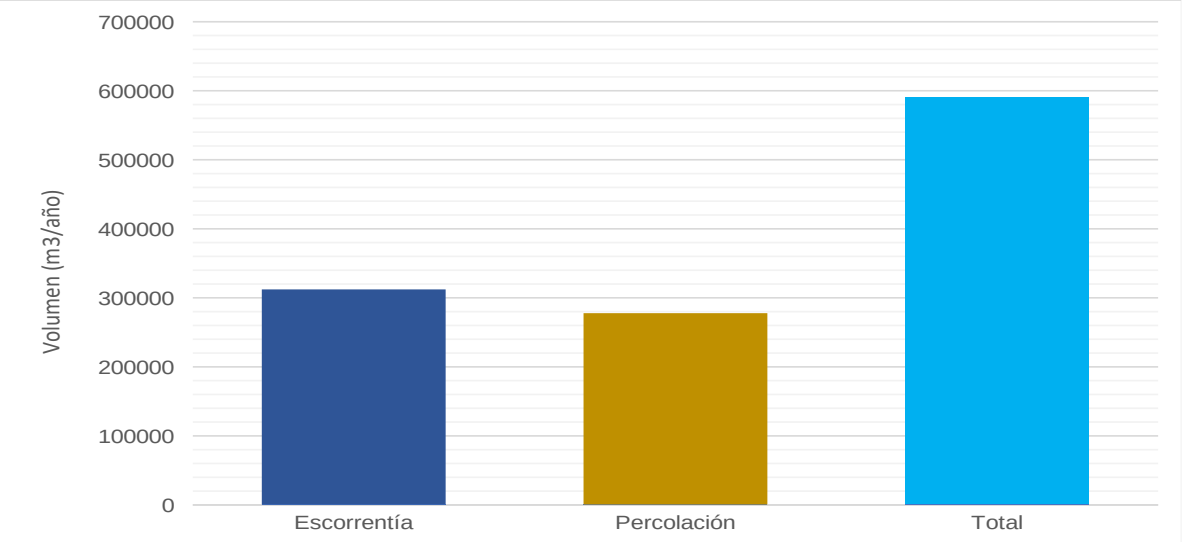
| Parámetro | Lámina de agua (mm/año) | Volumen (m3/año) |
|---|---|---|

| | | |
|---|---|---|
| Escorrentía | 623.166 | 311,583.00 |
| Percolación | 554.286 | 277,143.00 |
| Total | 1177.452 | 588,726.00 |

**Nota.** La tabla muestra lamina agua y volumen generado en el ecosistema de bofedal

## Figura 39

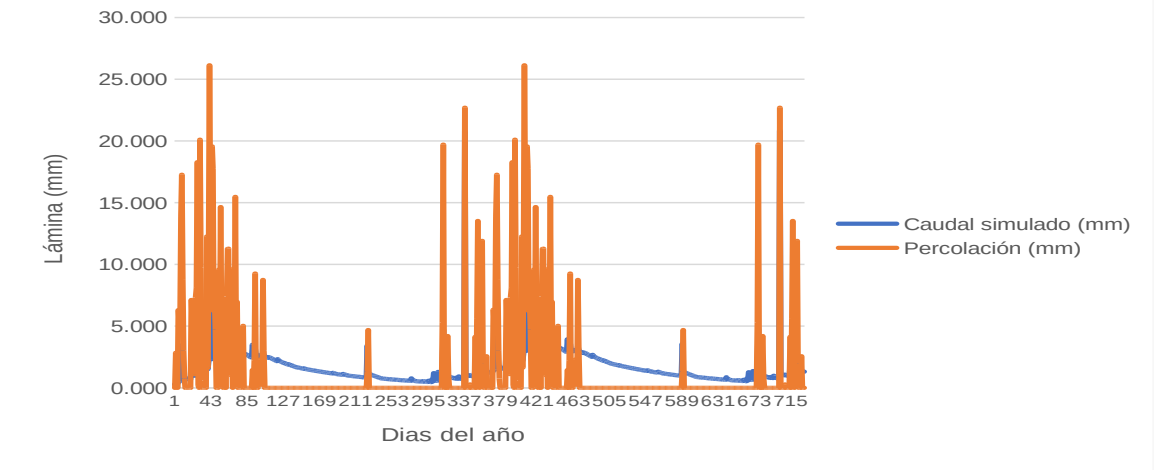
*Volúmenes de escorrentía y percolación*




**Nota.** La figura muestra volumen de escorrentía y percolación.

## Figura 40

*Relación de la escorrentía y percolación*




**Nota.** La figura muestra relación entre escorrentía y percolación.

En la figura 40, se evidencia la relación que existe entre la escorrentía y percolación, en el bofedal ubicada en el sector Rontoccocha. Donde se determina que la escorrentía se refiere al flujo de agua superficial que se produce cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, o cuando el suelo está saturado, la percolación por otro lado, se refiere al movimiento del agua a través del suelo hacia capas más profundas, como el perfil del suelo o los acuíferos subterráneos.

### 4.1.1. Análisis de correlatividad

Relación de las características de la precipitación en la capacidad de recarga hídrica en bofedales del sector Rontoccocha utilizando el coeficiente de correlación de Pearson.

En la siguiente tabla se visualizan el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación (se obtiene al elevar al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson) entre los indicadores identificados.

**Tabla 36**

*Coeficiente de correlación de Pearson*

| Relación | Coeficiente de correlación de Pearson | Coeficiente de determinación |
|---|---|---|
| Características de la precipitación VS recarga hídrica | 0.925806524 | 86% |

**Nota.** Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación entre las características de la precipitación y recarga hídrica.

Como se observa en la anterior tabla, el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables es positivo, lo cual indica que las variables se relacionan directamente.

Relación del porcentaje de estado de humedad del suelo con la capacidad de recarga hídrica.

En la tabla se aprecian el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación (calculado al elevar al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson) entre los indicadores seleccionados.

**Tabla 37**

*Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación*

| Relación | Coeficiente de Pearson | Coeficiente de Determinación |
|---|---|---|
| Estado de humedad del suelo VS la capacidad de recarga hídrica | -0.888292106 | 79% |

**Nota.** Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación entre estado de humedad del suelo y la capacidad de recarga hídrica.

Se observa en la tabla anterior que el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables es negativo, lo que indica una relación inversa. Esto significa que a medida que el estado de humedad del suelo aumenta, disminuye la capacidad de recarga hídrica.

Relación entre las características de la superficie del suelo con la capacidad de recarga hídrica. Se presenta una tabla que detalla el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación (calculado elevando al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson) entre las características de la superficie del suelo y la capacidad de recarga hídrica:

**Tabla 38**

*Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación*

| Características del Suelo | Coeficiente de Correlación | Coeficiente de Determinación |
|---|---|---|
| Textura del Suelo | 0.65 | 0.4225 |
| Porosidad | 0.72 | 0.5184 |
| Conductividad Hidráulica | 0.78 | 0.6084 |

| | | |
|---|---|---|
| Contenido de Materia Orgánica | 0.69 | 0.4761 |

**Nota.** Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación entre las características de la superficie del suelo con la capacidad de recarga hídrica.

Como se observa en la anterior tabla el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables es positivo lo cual indica que se relacionan directamente.

Relación entre las características del suelo con la capacidad de recarga hídrica.

A continuación, se exhibe la tabla que ilustra el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación (obtenido al elevar al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson) entre los indicadores seleccionados:

**Tabla 39**

*Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación.*

| Relación | Coeficiente de Pearson | Coeficiente de Determinación |
|---|---|---|
| Características del suelo vs Capacidad de recarga hídrica | -0.296940917 | 9% |

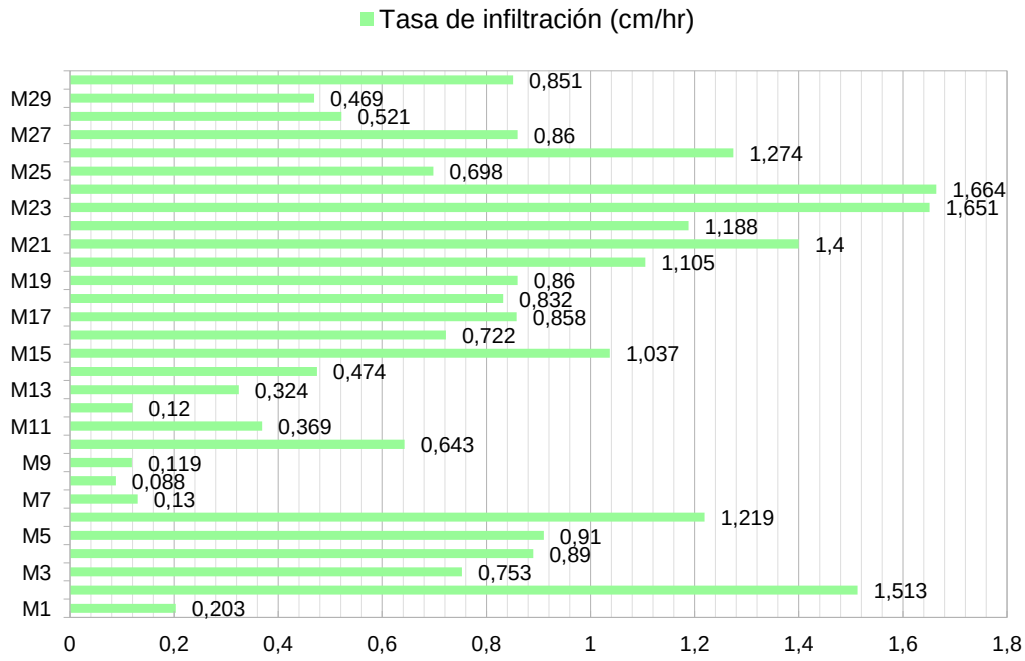
**Nota.** Coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación entre las características del suelo con la capacidad de recarga hídrica.

Se evidencia en la tabla el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables es negativo lo cual indica que se relacionan inversamente.

## Análisis inferencial de la infiltración según altitudes

### Figura 41

*Tasa de infiltración (cm/hr)*




**Nota.** Se muestra Tasa de infiltración (cm/hr) promedio de las muestras M1 a M30

La figura muestra la tasa de infiltración (cm/hr) de las muestras M1 a M30. La tasa de infiltración es una medida de la velocidad a la que el agua penetra en el suelo. Se mide en centímetros por hora (cm/hr).

En general, la tasa de infiltración disminuye a medida que aumenta la profundidad del suelo. Esto se debe a que el suelo superficial es más poroso y menos compacto que el suelo profundo. Como resultado, el agua puede penetrar más fácilmente en el suelo superficial. Algunas muestras, como M26 y M24, muestran una tasa de infiltración relativamente alta a todas las profundidades. Esto sugiere que estas muestras están hechas de un material que es muy permeable al agua. Otras muestras, como M14 y M12, muestran una tasa de infiltración muy baja a todas las profundidades. Esto sugiere que estas muestras están hechas de un material que es muy impermeable al agua.

**Tabla 40**

*Análisis de varianza de la tasa de infiltración (cm/hr)*

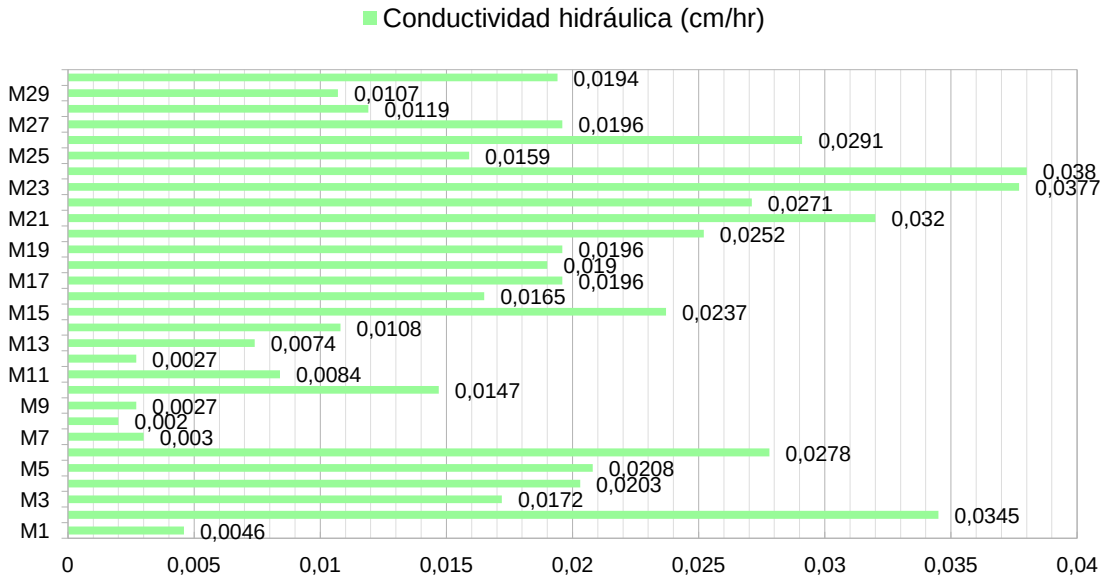
| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | p-valos |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 1.10 | 2 | 0.55 | 0.38 | 0.6841 |
| Grupo de altitud | 1.10 | 2 | 0.55 | 0.38 | 0.6841 |
| Error | 604.67 | 417 | 1.45 | | |
| Total | 605.78 | 419 | | | |

**Nota.** La tabla muestra Análisis de varianza de la tasa de infiltración (cm/hr) promedio de las muestras M1 a M30

La tabla de ANOVA resume el análisis estadístico realizado para evaluar si existe una diferencia significativa en la tasa de infiltración promedio entre los grupos de altitud de las muestras M1 a M30, en ella se visualiza que el p-valor es 0,6841, lo que significa que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que no existe una diferencia significativa en la tasa de infiltración promedio entre los grupos, por lo tanto con base en el análisis de varianza, no se puede concluir que haya una diferencia significativa en la tasa de infiltración promedio entre los grupos de altitud de las muestras M1 a M30. La variabilidad observada en la tasa de infiltración se debe principalmente a la variabilidad dentro de cada grupo, no a una diferencia real entre los grupos.

**Figura 42**

*Conductividad hidráulica (cm/hr)*




**Nota.** Se muestra Conductividad hidráulica (cm/hr) promedio de las muestras M1 a M30

La figura muestra la conductividad hidráulica (cm/hr) de las muestras M1 a M30. La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad de un material para permitir el flujo de agua. Se mide en centímetros por hora (cm/hr).

En general, la conductividad hidráulica disminuye a medida que aumenta la profundidad del suelo. Esto se debe a que el suelo superficial es más poroso y menos compacto que el suelo profundo. Como resultado, el agua puede fluir más fácilmente a través del suelo superficial. Algunas muestras, como M26 y M24, muestran una conductividad hidráulica relativamente alta a todas las profundidades. Esto sugiere que estas muestras están hechas de un material que es muy permeable al agua. Otras muestras, como M14 y M12, muestran una conductividad hidráulica muy baja a todas las profundidades. Esto sugiere que estas muestras están hechas de un material que es muy impermeable al agua.

**Tabla 41**

*Análisis de varianza de la conductividad hidráulica*

| Fuente de variacion | SC | GL | CM | Fc | p-valos |
|---|---|---|---|---|---|
| Modelo | 1.10 | 2 | 0.55 | 0.38 | 0.6841 |
| Grupo de altitud | 1.10 | 2 | 0.55 | 0.38 | 0.6841 |
| Error | 604.67 | 417 | 1.45 | | |
| Total | 605.78 | 419 | | | |

**Nota.** Se muestra Análisis de varianza de la conductividad hidráulica (cm/hr) promedio de las muestras M1 a M30

La tabla de ANOVA resume el análisis estadístico realizado para evaluar si existe una diferencia significativa en la conductividad hidráulica promedio entre los grupos de altitud de las muestras M1 a M30, en ella se visualiza que el p-valor es 0,6841, lo que significa que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que no existe una diferencia significativa en la conductividad hidráulica promedio entre los grupos, por lo tanto Con base en el análisis de varianza, no se puede concluir que haya una diferencia significativa en la conductividad hidráulica promedio entre los grupos de altitud de las muestras M1 a M30. La variabilidad observada en la conductividad hidráulica se debe principalmente a la variabilidad dentro de cada grupo, no a una diferencia real entre los grupos.

## 5.2. Discusión de resultados

La situación de la infiltración en bofedales en el sector Rontoccocha estudiada en cuanto a la altura infiltrada en los puntos seleccionados se encuentran dentro del rango de 0,2 y 7,9 cm, en cuanto a la velocidad de infiltración esta se encuentra dentro de rango de 0,72 y 210,00 cm/hr; y para la lámina de infiltración acumulado se encuentra dentro del rango de 2,50 y 52,60 cm, llegando a su punto de saturación en tiempo un promedio de 120 min considerando todas las muestras del estudio. En contraste con Delgadillo y Pérez (2016), quienes en su investigación obtuvieron parámetros de infiltración dentro de un intervalo de rangos superior, tanto para la altura infiltrada y la velocidad de infiltración.

El análisis estadístico mediante el coeficiente de correlación de Pearson para cada indicador mostró valores de -0,88, 0,92, 0,41, -0,29 y se encontraron valores negativos y positivos para todos los indicadores. En concordancia con el informe publicado por RAMSAR (2013), donde el coeficiente de determinación osciló entre el 29,9% y el 86%, lo que indica que los bofedales siguen disminuyendo tanto en superficie como en calidad, con una reducción estimada del 64% al 71% de los bofedales en todo el mundo a lo largo del siglo XX.

Uno de los factores importantes para la recarga hídrica es tener una buena cobertura vegetal, un alto coeficiente de percolación, por el cual se recarga el acuífero y los resultados se evidencian en los afloramientos como los manantiales, ubicados en el sector Rontoccocha, en la presente investigación este valor de percolación se obtiene utilizando la metodología de CUBHIC, no teniendo aun registros de otras investigaciones específicas para estudios de recarga hídrica mediante la metodología mencionada.

En las recomendaciones de la tesis titulada "Práctica ancestral de cosecha de agua, para el aprovechamiento y almacenamiento - 2021", desarrollada por Rosa Barturen en la PUCP en 2021, se sugiere la inclusión de información relacionada con los acuíferos (por ejemplo, recarga, saturación, rendimiento) en la herramienta CUBHIC. A pesar de que CUBHIC cuenta con esta opción, la tesis en cuestión no pudo considerarla debido a la falta

de datos de campo. Sin embargo, se considera que esta incorporación sería un aporte significativo para futuros estudios.

Tomando en consideración la recomendación de la tesis de investigación mencionada, se realizó trabajos de campo como pruebas de infiltración, las mismas que permiten determinar tasas de infiltración y estos resultados obtenidos compararlos con la percolación mediante la metodología de CUBHIC.

## VI. Conclusiones

1. Los hallazgos revelan que la situación de la infiltración en los bofedales del área estudiada en cuanto a la altura infiltrada en los puntos seleccionados se encuentra dentro del rango de 0,2 y 7,9 cm, en cuanto a la velocidad de infiltración esta se encuentra dentro de rango de 0,72 y 210,00 mm/hr; y para el volumen acumulado se encuentra dentro del rango de 2,50 y 52,60 cm de agua, llegando a su punto de saturación en tiempo un promedio de 120 min. Se precisa que la evolución en el tiempo del índice de velocidad de infiltración en cada una de las muestras es completamente variable y varía de un índice mínimo a un índice máximo en cada una de las muestras.
2. Los resultados muestran que, la capacidad de recarga hídrica esta enmarca por la escorrentía generada que es de 623,16 mm/ha/año, el mismo que genera 311 583 $m^3$/año, en un área de 50 ha de ecosistema de bofedal, mientras que la percolación es de 554,28 mm/año, que genera 277 143 $m^3$/año, para la misma área de bofedal, donde se estima que la oferta hídrica total en este ecosistema es de 588 726 $m^3$/año.
3. Los promedios de la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica proporcionan una medida general del comportamiento hidrológico de las muestras. Estos valores promedio varían de una muestra a otra, lo que indica que la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica son propiedades del suelo que pueden diferir considerablemente según la ubicación y las características locales.

## VII. Recomendaciones

1. Implementación de un programa de monitoreo a largo plazo, dado que hemos demostrado la importancia de la infiltración y la capacidad de recarga hídrica en los bofedales, es esencial establecer un programa de monitoreo continuo. Esto permitirá seguir de cerca los cambios en la dinámica hídrica y evaluar la efectividad de las medidas de conservación a lo largo del tiempo.
2. Priorización de acciones de conservación y restauración, en consonancia con nuestras conclusiones sobre la influencia de los bofedales en la regulación hídrica, se recomienda priorizar acciones de conservación y restauración en estas áreas. Esto implica la protección de los bofedales existentes, la restauración de áreas degradadas y la implementación de prácticas de manejo sostenible.
3. Promoción de la participación comunitaria, dada la importancia de las comunidades locales en la gestión de los recursos hídricos, se sugiere promover la participación activa de estas comunidades en la conservación de los bofedales. Esto puede lograrse a través de programas de capacitación, sensibilización y participación en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de los bofedales.
4. Fomento de la investigación interdisciplinaria, considerando la complejidad de los bofedales y su relación con otros aspectos ambientales, se insta a promover la investigación interdisciplinaria en esta área. Esto incluye estudios que aborden la interacción entre los bofedales y el cambio climático, la contaminación y otros ecosistemas acuáticos.

## VIII. Referencias

Medina, M. A., Scott-Morales, L., Vela , P., Cotera, M., & Estrada, E. (2023). Análisis temporal de uso del suelo en un sitio Ramsar (Núm. 1981) en el centro de Nuevo León. *Mexicana de Ciencias Forestales, 14*(79), 107-134. https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1356

Abeledo, S. (2014). Pastoreo trashumante comienzos de un nuevo siglo: su vigencia en santa rosa de los pastos grandes (departamento de los andes, salta). *Andes*(25). https://www.redalyc.org/pdf/127/12738569007.pdf

Alegría , M. A., Pozo , V. L., & Rojas , M. (2000). *Protección de humedales (vegas y bofedales) en el norte de Chile.* http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/7136

Alzérreca, H., & Luna, D. (2001). Características y distribución de los bofedales en el ámbito Boliviano. *science open*.

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidroloía de superficie.* Mexico: Limusa S.A. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoreno/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf

Autoridad Binacional Autònoma del Sistema Hìdrico del Lago Titicaca, Rio Desaguadero, Lago Poopò, Salar de Coipasa. (2023). *Uso y manejo del agua en bofedales - potenciaciòn de camelidos.* ALT. https://alt-perubolivia.org/?wpdmpro=uso-y-manejo-del-agua-en-bofedales-potenciacion-de-camelidos

Autoridad Nacional del Agua. (2009). Medidas para la adaptaciòn al cambio climatica - Diagnostico situacional de recarga de acuiferos. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/diagnostico_situacional_de_recarga_de_acuiferos_0_2.pdf

Baptista, P., Fernández, C., & Hernández , R. (2014). *Metodología de la Investigación* (8va ed.). McGraw Interamericana.

Barajas, C. L. (2020). Análisis de la variabilidad espacio-temporalidad de humedales en la ciudad de Bogota a través de índices expectrales, como herramienta de

monitoreo y gestion de recurso hídrico. tesis de maestria, Universidad Nacional de Colombia, Bogota-Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/jandle/unal/80102

Calderón , M. (2018). *Oferta hídrica, almacenamiento de agua y carbono en dos escenarios altoandinos del Páramo de Mojanda-Ecuador.* Tesis de Maestría, Universidad Nacional de la Plata. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/69324/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Calvo, V. (2018). *Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de bofedales de alta montaña.* Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina. https://hdl.handle.net/20.500.12996/2604

Carrasco Díaz, S. (2009). *Metodología de la investigación científica.* Lima - Perú: San Marcos.

Carrasco, S. (2006). *Metodología de investigación científica.* Editorial San Marcos.

Chow, V. T. (1996). *Hidrología aplicada.* Hidro sm.

Cotler, H., Garrido, A., Mondragón , R., & Díaz, A. (2007). Delimitacion de las cuencas hidrográficas de México a escala 1:250000. *INEGI-INE-CONAGUA*. https://core.ac.uk/download/pdf/48030589.pdf

Custodio, E., & Llamas , M. R. (1983). *Hidrología subterranea* (Vol. II). Omega.

Custred, G. (1977). “Las punas de los Andes Centrales”. En flores (compilador). (I. d. Peruanos, Ed.) Lima.

Delgadillo, O., & Pérez, L. (2016). Medición de la infiltración del agua en el suelo, método de la doble anilla.

Faustino, J. (2006). Identificación , evaluacion y manejo de zonas de recarga hidrica (notas de clase). San Salvador: Catie.

Faustino, J. (2006). Manejo de Cuencas II. *Caritas*.

Galarza, P. (2020). *Evaluación del estado de conservación del bofedal sector Moya en el Santuario Histórico de Chacamarca, Junin.* Tesis , Universidad Nacional Agraria la Molina, Junin, perú. https://hdl.handle.net/20.500.12996/1852

García, E., & Otto, M. (2015). Caracterización ecohidrológica de humedales altoandinos mediante imágenes satelitales multitemporales en la cabecera del río Santa, Ancash, Perú. Ecológico. aplicación. *2*, 115-125. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162015000200004&lng=es&nrm=iso>

Garcia, E., & Otto, M. (2015). Caracterización ecohidrológica de humedales altoandinos usando imagenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Rio Santa, Ancash Peru. *Ecología Aplicada, 14*(2), 115-125.

Gurovich, L. (1985). Fundamentos y diseños de sistema de riego. San Jose: IICA.

Huayhua, C. (2021). *Valoración económica de los flujos hidrológicos y la biodiversidad por el uso del agua en la cuenca del rio Mariño.* Tesis pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes, Apurimac, Abancay. http://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/144

Imbaquingo, J. (2021). Monitoreo de bofedales en la subcuenca del rio Chambo mediante el analisis multicriterio usando imagenes landsat 8 para el periodo 2013 - 2022. Tesis de maestria, Universidad de Manizales, Riobamba - Ecuador. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/5481

Instituto Nacional de Bosques. (2003). Boletín de estadistica forestal. *Inab*. http://www.inab.go

Irineo, L. (2019). Caracterización morfología físico químico y bacteriológica de los bofedales del municipio de Huarina. La Paz - Bolivia. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/5163

Llanos, R. (2021). Estudio paleoambiental de turberas tropicales altoandinas en la cabecera de cuenca Cachi, Ayacucho, y su importancia como sumideros de carbono. Lima. https://hdl.handle.net/20.500.12996/4745

Maldonado, F. (2014). Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana. *International Mire Conservation Group and International Peat Society, 15*.

Matus, Ó., Faustino , J., & Jiménez , F. (2007). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de carga hidrica en subcuencas hidrográficas validación en la subcuenca del rio Jucuapa, Nicarahua. *Recursos Naturales y Ambiente/no*. https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6573/Metodologia_para_la_identificacion_participativa_de_zonas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ochoa, B., Cuadros, J., & Bonnesoeur, V. (2022). Cubhic 2.0:, documento metodológico: humedales. *Forest Trends*.

Omonte, R. (2022). Relación de la profundidad del suelo con el contenido de carbono orgánico en tres altoandinos de la microcuenca Apacheta. Ayacucho 2016. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho. https://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/4982/1/TESIS%20B919_Omo.pdf

Oviedo, M. E. (2017). Propuesta para indicadores ambientales para humedales altoandinos: humedal de Tibanica. Bogota. http://hdl.handle.net/11349/7599

Pedrozo, H., Rosenberger, M., & Schvezov, C. (2015). Comparación entre Modelos en Diferencias Finitas Aplicados a la Infiltración en Suelos. *Ciencia y Tecnología*, 36-44. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-75872015000100006&lng=es&tlng=es.

Quispe, J. (2011). Evaluacion de la dinamica hidrologica en bofedales de la zona de Tuni Condoriri (provincia los Andes - La Paz). Tesis, La Paz. http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/12520

Quispe, R. (2018). *Valoración económica del servicio ambiental hidrológico del bofedal Viluyo del distrito de Nuñoa - Melgar.* Tesis, Universidad Nacional del Altiplano. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/7522

Ramsar. (2013). Manual de la Convención de Ramsar. En *Guía de la convención sobre los humedales (Ramsar, Irán, 1971)* (6 ed.). Irán. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-sp.pdf

Reynolds, D. (1991). Comparación de las estimaciones de conductividad hidráulica saturada del infiltrómetro de tensión, el infiltrómetro de presión y el núcleo del suelo. Canada.

Salvador, F., Monerris, J., & Rochefort, L. (2014). Peatlands of the Peruvian Puna ecoregion: types, characteristics and disturbance. *International Mire Conservation Group and International Peat Society*. http://www.mires-and-peat.net/

Sierra, J. (2019). Evaluación de la recarga hídrica y escasez del manante marcamarca en la microcuenca mariño provincia de Aabancay, región Apurimac - 2019. Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de los Andes, Apurímac, Abancay. https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/484

Vélez, M. V., & Vázquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Avances en Recuersos Hidráulicos*(11). http://resistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/93044

Villasante, J. F. (2021). Influencia del cambio climático sobre humedales altoandinos: estudio comparativo entre un humedal manejado (Perca, Castilla, Arequipa) y uno no manejado (Ccallaccapcha, La Unión, Arequipa). Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San agustin, Arequipa. http://hdl.handle.net/20.500.12773/13200

Villón , M. (2002). *Hidrología.* Cartago, Costa Rica: Maxsoft. https://mega.nz/file/bEwAhSrY#OTeUL0oax4gsja4PKx5xrIy2j6RGkLA9hmoWRSjRuNQ