

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**



**INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO EN UNA MICROCUENCA DEL
RÍO ATOYAC, VALLE DE PUEBLA-TLAXCALA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

PRESENTA:

I.Q. GUADALUPE SANTAMARÍA FLORES

REALIZADO CON LA DIRECCIÓN DEL

DR. HIPÓLITO MUÑOZ NAVA

TUTORAS

DRA. JANETTE ARRIOLA MORALES
DRA. ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS



IXTACUIXTLA, TLAX., JULIO 2023

Agradecimientos

Agradezco al posgrado en Ciencias en Sistemas del Ambiente por la formación profesional.

Agradezco al CONACyT por la beca que me fue otorgada durante los estudios de maestría.

Agradezco a los catedráticos por los conocimientos impartidos para mi formación.

Agradezco a los ejidatarios: Q.P.E Daniel Serrano Quiroz, Miguel Santamaria Quiroz, David Valencia, Rubén Diaz, Martin Santamaria, Pedro Petlachi, Gerardo Pérez, Abraham Mendoza, Tereso Salazar, Enrique Flores, Encarnación Luna, Marcial y a todos los ejidatarios que directa e indirectamente me permitieron realizar las mediciones de infiltración en sus ejidos para la realización de este proyecto.

Agradezco al comité tutorial Dr. Hipólito Muñoz Nava, Dra. Janette Arriola Morales y Dra. Elizabeth García Gallegos por su tiempo y apoyo para la realización de este trabajo.

Agradezco a todas las personas que directa o indirectamente se involucraron en la realización de este trabajo de investigación.

Agradecimientos personales

A Dios, gracias por tu amor y bondad, hoy me permites sonreír ante este logro que es el resultado de tu ayuda. Gracias por estar siempre presente en mi vida ofreciéndome lo mejor y buscando lo mejor para mí.

Entren por sus puertas con acción de gracias; vengan a sus atrios con himnos de alabanza; denle gracias, alaben su nombre. Porque el Señor es bueno y su gran amor es eterno; su fidelidad permanece para siempre (Salmo 100:4-5).

Al Dr. Hipólito Muñoz Nava, director de mi tesis por su dedicación, paciencia y consejos para la realización de este trabajo, con la finalidad de ayudarme a superarme día a día.

A la Dra. Janette Arriola Morales por apoyo, paciencia, tiempo y por sus consejos.

A la Dra. Elizabeth García Gallegos por el apoyo al avance de este trabajo de investigación, por las correcciones, el tiempo dedicado y sobre todo por su paciencia.

Al Dr. Oscar G. Cuecuecha, a la M. en C. Eunice, por el apoyo, por sus consejos y por la confianza que me brindaron en este laboratorio para el desarrollo de mi proyecto.

Al Dr. José Jiménez por los conocimientos brindados, por el tiempo dedicado, paciencia y consejos, gracias por creer en mí.

A mi primo: Leoncio Flores Corona, a mi hermana Vianney Santamaria, y a mis papás por acompañarme durante el proceso de investigación en campo y sobre todo por el gran cariño.

A mis amigos: Nestor Gutiérrez por su amistad, por su alegría y sobre todo por motivarme y apoyarme, a Nestor García por las vivencias, anécdotas compartidas, por el apoyo, por su gran cariño en todos estos años.

A toda mi familia Santamaria y familia Flores, por sus consejos, cariño, motivación y por su gran apoyo.

Finalmente agradezco, a todos aquellos que no creyeron en mí, con su actitud lograron que tomará más impulso.

Dedicatorias

Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta y sobre todo por no soltarme de la mano.

A mis padres: Abelina Flores y Miguel Santamaria por todo su amor, quienes me impulsan a ser mejor cada día y me ayudan a levantarme en cada caída.

A mi hermana Vianney por su amistad, confianza, secretos y sueños que hemos compartido.

A Manuel por brindarme su confianza, apoyo, cariño y alegría, por motivarme a culminar este proyecto. Gracias por estar conmigo.

A mis abuelos Angela Hernández y Miguel Santamaria, desde el cielo son esa luz que me daban fuerzas para continuar con mis sueños.

A Edgar Adán desde el cielo, por tu cariño y alegría, quien me enseñó a valorar la vida, a mantener una actitud positiva y realista ante tropiezos, enfermedades o problemas y que no elegimos lo que nos sucede, pero si escogemos qué hacer con aquello que nos sucede.

ÍNDICE

RESUMEN	11
I INTRODUCCIÓN	13
I.1 Marco teórico.....	14
I.1.1 Agua	14
I.1.2 Ciclo hidrológico	15
I.1.3 Evaporación	17
I.1.4 Condensación	19
I.1.5. Precipitación.....	19
I.1.6. Infiltración	22
I.1.7. Cuenca hidrográfica	24
I.1.8. Cuenca hidrológica río Alto Atoyac.....	27
I.1.9. Balance de agua.....	28
I.2 Antecedentes	33
I.2.1. Balance hídrico	33
I.2.2 Tasa de infiltración	35
I.3 Pregunta de investigación	36
I.4 Hipótesis	37
I.5 Justificación	37
I.6 Objetivos	37
I.6.1 General	37
I.6.2 Específicos	37
II METODOLOGÍA.....	38
2.1 Área de estudio.....	38
2.2 Aplicación de encuestas	39
2.3 Medición de la infiltración <i>in situ</i> con doble anillo	39
2.3.1 Selección de los puntos de medición de la infiltración	40
2.3.2 Medición de la infiltración	40
2.3.3 Análisis de datos de las mediciones de infiltración.....	41
2.4 Medición de la textura de suelo	44
2.5 Medición de la infiltración con lisímetro	46
2.6 Medición de la precipitación	46

2.7 Medición de la temperatura y humedad ambiental y del suelo	47
2.8 Relación entre la infiltración y parámetros ambientales	47
III RESULTADOS	48
3.1 Aplicación de encuestas	48
3.2 Medición de la infiltración <i>in situ</i> con doble anillo	50
3.3 Medición de la textura de suelo	63
3.4 Medición de la infiltración con el lisímetro	63
3.5 Medición de la precipitación	65
3.6 Medición de la temperatura y humedad, en el aire y en el suelo	66
3.7 Relación entre la infiltración y parámetros ambientales	68
IV DISCUSIÓN	71
4.1 Aplicación de encuestas	71
4.2.2 Medición de la infiltración	71
4.2.3 Análisis de datos de las mediciones de infiltración	71
4.3 Medición de la textura de suelo	72
4.4 Medición de la infiltración con lisímetro	73
4.5 Medición de la precipitación	74
4.6 Medición de la temperatura y humedad, en el aire y en el suelo	74
4.7 Relación entre la infiltración y parámetros ambientales	74
V CONCLUSIONES	75
VII REFERENCIAS	76
VII ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Zonificación altitudinal de la cuenca del río Jamapa	23
Tabla 2. Aplicación de encuestas a los propietarios de los terrenos ejidales de Santo Tomás La Concordia	47
Tabla 3. Aplicación de encuestas a los propietarios de los terrenos ejidales de San Rafael	49
Tabla 4. Puntos de medición del sitio Santo Tomás La Concordia.....	50
Tabla 5. Puntos de medición del sitio San Rafael	51
Tabla 6. Promedios de los parámetros del modelo exponencial y estimaciones de infiltración Horton, en diferentes sitios de La Concordia, Nativitas	53
Tabla 7. Promedios de los parámetros del modelo exponencial y estimaciones de infiltración Horton, en diferentes sitios de San Rafael	53
Tabla 8. Valores del porcentaje de partículas de suelo en los diferentes sitios	67
Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson en La Concordia	72
Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson en Tenanyecac.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de agua (Fernández, 2012).	14
Figura 2. Proceso del ciclo hidrológico (Maderrey y Jiménez, 2005).	17
Figura 3. Evaporación (Musy, 2001).	17
Figura 4. Precipitación por convección, orográfica y frontal. (Musy, 2001).	20
Figura 5. Cuenca, subcuenca y microcuenca. Adaptado por Casaverde, 2011, en (Ordoñez, 2011).	27
Figura 6. Cuenca Alto Atoyac (Elaboración propia).	28
Figura 7. Cuenca tipo vertiente (Rosales, 2012).	29
Figura 8. Cuenca lacustre (Rosales, 2012).	30
Figura 9. Cuenca lacustre con afluente (Rosales, 2012).	31
Figura 10. Cuenca endorreica (Rosales, 2012).	32
Figura 11. Subcuenca río Atoyac. Elaboración propia.	38
Figura 12. Sitios de medición con infiltrómetro de doble anillo.	39
Figura 13. Registro de humedad y temperatura del suelo.	40
Figura 14. Anillo interno colocado en el centro respecto al anillo externo.	40
Figura 15. Anillos hincados.	40
Figura 16. Medición de infiltración con infiltrómetro de doble anillo.	41
Figura 17. Representación del modelo de Horton. Fuente: Ruiz y Martínez (2003).	42
Figura 18. Modelo de Horton. Fuente: Muñoz-Nava, comunicación personal.	43
Figura 19. Determinación de textura de suelo.	45
Figura 20. Triángulo de clases texturales de los suelos (Juárez, 2003).	45
Figura 21. Lisímetro de polietileno.	46
Figura 22. Pluviómetro.	47
Figura 23. Medición de temperatura y humedad con equipo Hubb.	47
Figura 24. Parcela con obstáculo de árboles para la medición de infiltración.	53
Figura 25. Proceso de hincar los anillos para la medición de infiltración.	53
Figura 26. Obtención de las lecturas de infiltración.	53
Figura 27. Tasa de infiltración del punto 1.	55
Figura 28. Tasa de infiltración punto 2.	55
Figura 29. Tasa de infiltración del punto 3.	55
Figura 30. Tasa de infiltración del punto 4.	56
Figura 31. Tasa de infiltración del punto 5.	56
Figura 32. Tasa de infiltración del punto 6.	56
Figura 33. Tasa de infiltración del punto 7.	57
Figura 34. Tasa de infiltración del punto 8.	57

Figura 35. Tasa de infiltración del punto 9.	57
Figura 36. Tasa de infiltración del punto 10.	58
Figura 37. Tasa de infiltración del punto 11.	58
Figura 38. Tasa de infiltración del punto 12.	58
Figura 39. Tasa de infiltración del punto 1.	59
Figura 40. Tasa de infiltración del punto 2.	59
Figura 41. Tasa de infiltración del punto 3.	59
Figura 42. Tasa de infiltración del punto 4.	60
Figura 43. Tasa de infiltración del punto 5.	60
Figura 44. Tasa de infiltración del punto 6.	60
Figura 45. Tasa de infiltración del punto 7.	61
Figura 46. Tasa de infiltración del punto 8.	61
Figura 47. Tasa de infiltración del punto 9.	61
Figura 48. Tasa de infiltración del punto 10.	62
Figura 49. Tasa de infiltración del sitio punto 11.	62
Figura 50. Tasa de infiltración del punto 12.	62
Figura 51. Infiltración con el lisímetro 1.....	64
Figura 52. Infiltración con el lisímetro 2.....	64
Figura 53. Infiltración con lisímetro 3.	65
Figura 54. Valores de precipitación pluvial por día, durante un año igual a 1 367.2 mm.....	66
Figura 55. Eventos pluviales en categoría de 5 mm	66
Figura 56. Humedad y temperatura del aire en los dos sitios con equipo Hubb.....	67
Figura 57. Humedad y temperatura del suelo obtenida con equipo hubb	68
Figura 58. Tasa de infiltración (Ti) por clase textural del suelo, en La Concordia, Nativitas.....	70
Figura 59. Tasa de infiltración (Ti) por clase textural del suelo en San Rafael.	70

RESUMEN

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie ingresa al suelo, pero se ve influenciada por la cubierta vegetal y el tipo de suelo. Mientras que, la tasa de infiltración es una medida que indica la capacidad que tiene el suelo de absorber la precipitación. El objetivo del presente trabajo fue medir la infiltración de agua en el suelo en una microcuenca del río Atoyac Valle de Puebla- Tlaxcala, y su relación con la textura del suelo y la temperatura. Se seleccionaron doce puntos dentro de las comunidades La Concordia y otros doce en San Rafael Tenanyecac, municipio de Nativitas. En estas dos comunidades se aplicaron encuestas a los productores para conocer el manejo del suelo. Las mediciones de infiltración se realizaron con un infiltrómetro de doble anillo, para posteriormente obtener la tasa de infiltración por el modelo de Horton. Se determinó la textura del suelo y clase textural. Para cuantificar la cantidad de agua infiltrada se empleó un lisímetro, la precipitación se obtuvo a través de un pluviómetro, la temperatura y humedad con un equipo Hubb. Los resultados indicaron que las constantes de Horton presentaron valores disímolos, es decir, los valores promedio de los doce puntos de medición de f_0 , k y F_c fueron menores en La Concordia con respecto a San Rafael Tenanyecac. En nueve sitios de San Rafael predomina la fracción arena >50%, mientras que, en La Concordia en todos los suelos de los puntos seleccionados osciló entre 58.74 y 90.74%. La infiltración del agua pluvial en los lisímetros ocurrió cuando el suelo alcanzó la saturación, la lámina de agua infiltrada fue de 241 mm al año, siendo los eventos de mayor precipitación los meses de junio a septiembre. Se tuvieron 101 eventos pluviales, lo que dio un total de 1 389.2 mm. La temperatura mínima y máxima de la zona fue de 6°C a 27°C. Con base a la clase textural en La Concordia fue franco arenoso y la tasa de infiltración de 12.19 cm/h; mientras que, en San Rafael fue de 15.16 cm/h, lo que sin duda depende del manejo y de los cultivos establecidos, evidenciándose más en La Concordia.

ABSTRACT

Infiltration is the process by which surface water enters the soil, but is influenced by vegetation cover and soil type. While, the infiltration rate is a measure that indicates the capacity of the soil to absorb precipitation. The objective of this work was to measure the infiltration of water into the soil in a micro-basin of the Atoyac River Puebla-Tlaxcala Valley, and its relationship with soil texture and temperature. Twelve points were selected within the La Concordia communities and another twelve in San Rafael Tenanyecac, municipality of Nativitas. In these two communities, surveys were applied to producers to learn about soil management. The infiltration measurements were made with a double ring infiltrometer, to later obtain the infiltration rate by the Horton model. Soil texture and textural class were determined. To quantify the amount of infiltrated water, a lysimeter was used, the precipitation was obtained through a rain gauge, the temperature and humidity with a Hubb equipment. The results indicated that Horton's constants presented dissimilar values, that is, the average values of the twelve measurement points of f_0 , k y F_c were lower in La Concordia with respect to San Rafael Tenanyecac. In nine sites of San Rafael the sand fraction >50% predominates, while in La Concordia it was in all the soils of the selected points, which ranged between 58.74 and 90.74%. The infiltration of rainwater in the lysimeters was when the soil reached saturation, the depth of infiltrated water was 241 mm per year, with the highest rainfall events being the months of June to September. There were 101 rainfall events, which gave a total of 1 389.2 mm. The minimum and maximum temperature in the area was 6°C to 27°C. Based on the textural class in La Concordia it was sandy loam and the infiltration rate was 12.19 cm/h; while in San Rafael it was 15.16 cm/h, which undoubtedly depends on the management and established crops, being more evident in La Concordia.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento imprescindible para el desarrollo de la vida sobre la Tierra, por lo que el hombre siempre se ha preocupado por satisfacer sus necesidades básicas y secundarias de este líquido (Maderey, 2005). De acuerdo con Morejón (2015), la disponibilidad de recursos hídricos en una zona es función del volumen anual promedio del agua que recibe, de la que vuelve a la atmósfera por transpiración y evaporación (en conjunto evapotranspiración) y también de la diferencia de disponibilidad hídrica en la época de lluvia y seca o menos lluviosa. Cada una presenta escenarios muy diferenciados que requieren un análisis individual de los balances hidrológicos.

A nivel nacional, el recurso hídrico, está siendo significativamente afectada por la presión humana, agravando cada vez más su disponibilidad (cantidad y calidad). Estos factores de presión conllevan a la sobreexplotación de los acuíferos, el vertimiento de sustancias contaminantes a los cuerpos de agua, los cambios en el uso del suelo; tales como, la deforestación, las prácticas agrícolas inadecuadas, el incremento de urbanizaciones en zonas de producción hídrica (Ordoñez, 2011). Las cuencas otorgan bienes y servicios ambientales invaluable para la existencia, como son el suministro de agua dulce, la regulación del caudal de los ríos, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, la regulación de la erosión del suelo a las respuestas a eventos naturales extremos, entre otros (Balvanera y Cotler, 2009).

En México, del total de agua extraída de los acuíferos el 9.12 % es para uso industrial, el 14.5% para abastecimiento público y el 76.3% para uso agrícola (EAM, 2017). Esta disminución en la disponibilidad de agua junto con un alto índice de crecimiento poblacional, generan conflictos, los cuales se van incrementando y tienden a intensificarse; si no se implementan las medidas adecuadas, como la regulación del uso del agua por medio de mecanismos de planificación, distribución de forma racional, normas y leyes que permitan su protección, la disponibilidad de este fundamental líquido disminuirá cada vez más y por consiguiente, su obtención se dificultará y encarecerá de manera importante, por lo que es indispensable determinar la recarga del acuífero a través del balance de agua, lo que permitirá estimar la disponibilidad de agua de la

subcuenca del río Atoyac para las diferentes actividades económicas de la microcuenca de Nativitas; tales como, agrícola y ganadera, así como para la población, de esta manera se contribuirá con la sustentabilidad del recurso hídrico en la microcuenca.

I.1 Marco teórico

I.1.1 Agua

El agua es una sustancia natural compuesta por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, cubre alrededor de las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra en forma de mares, océanos, lagos o ríos. El agua está presente en el aire y en el suelo. Sus estados físicos son: líquido, sólido o gaseoso, es la sustancia más abundante en nuestro planeta y en los organismos, constituye el 70% del peso de cualquier sistema viviente, por lo cual sin agua no podría haber vida. Del total del agua en el planeta el 97.5% es agua que proviene del océano y el 2.5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares simbolizan aproximadamente el 80% del agua dulce, del agua subterránea 19% y el agua superficial el 1%. Esta baja cantidad de agua superficial se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%) (Fernández, 2012; Pérez y Molina, 2013) (Figura1).

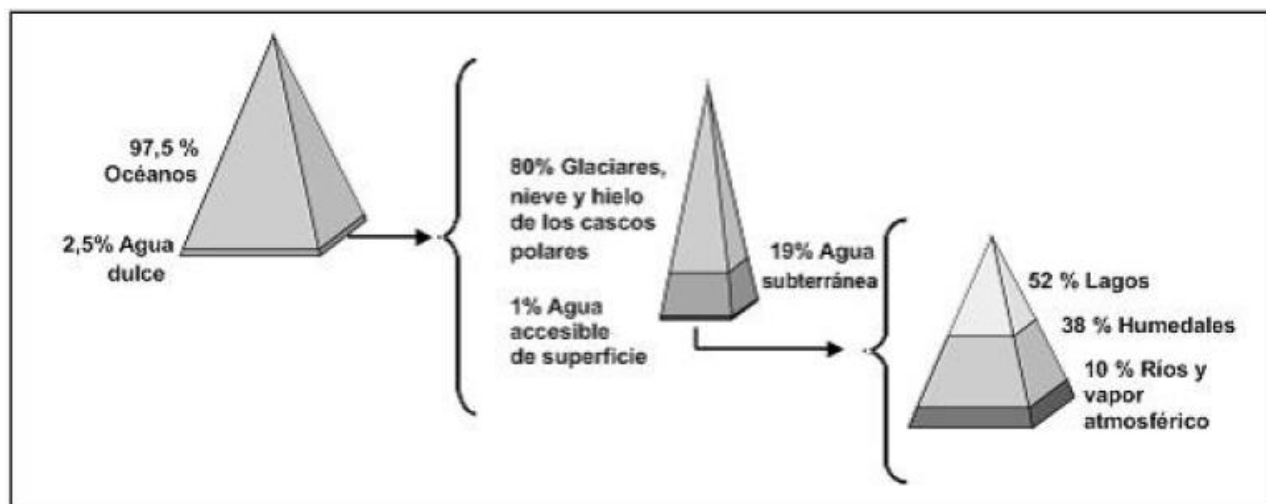


Figura 1. Distribución de agua (Fernández, 2012).

I.1.2 Ciclo hidrológico

El agua en la naturaleza nunca permanece estática, presenta un constante dinamismo, en el cual se definen diferentes etapas o fases; éstas por su manera de enlazarse, generan un ciclo (Maderey y Jiménez, 2005). El ciclo hidrológico también conocido como ciclo del agua, es un proceso biogeoquímico, el cual es un conjunto de transferencia de agua entre la atmósfera y los continentes, en un espacio llamado hidrósfera, que se extiende aproximadamente unos 15 km dentro de la atmósfera (en la tropósfera), hasta alrededor de 1 km de profundidad en la litósfera o corteza terrestre, en sus tres estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. Este ciclo se mantiene en continuo movimiento por la energía proveniente del sol (Córdova y Rodríguez, 2019).

El ciclo hidrológico se conforma en tres fases principales: la precipitación, la evaporación y el flujo, que incluye la circulación tanto superficial como subterráneo. El ciclo empieza con la evaporación de agua desde la superficie del océano u otras masas de agua superficiales como: lagos, ríos y manantiales. La cantidad de agua evaporada varía, siendo mayor la cantidad donde la radiación solar es más intensa. A medida que el vapor de agua asciende a la atmósfera, se enfría y se transforma en agua estado líquido, a este proceso se le conoce como condensación. La acumulación de agua condensada da lugar a la formación de nieblas y nubes, cuando las gotas de agua caen por su propio peso se presenta el fenómeno denominado como precipitación, si la temperatura de la atmósfera desciende al punto de congelamiento, el agua precipita en estado sólido, es decir cae en forma de nieve o granizo. Por otro lado, cuando la temperatura de la atmósfera es mayor al punto de congelamiento y el vapor de agua se condensa, la precipitación ocurre en estado líquido, en forma de gotas de lluvia. Cierta cantidad de agua precipitada se puede almacenar temporalmente en la superficie de la tierra (Fetter, 2001; Maderey y Jiménez, 2005).

De acuerdo con Fetter (2001), los poros del suelo contienen aire y agua, a esto se le conoce como zona vadosa o zona de aireación. En la parte superior de esta zona se encuentra una capa de suelo donde las raíces de las plantas aprovechan el agua. Las plantas en su metabolismo liberan agua en forma de vapor, a este proceso se le llama

transpiración, el agua evaporada del suelo más la transpiración se le conoce como evapotranspiración.

El agua tiene la capacidad de infiltrarse en el suelo y en terrenos permeables, es decir el agua tiende a desplazarse de manera vertical, por lo que forma parte del acuífero. Sin embargo, cuando el terreno es impermeable o tiene fracturas o semifracturas el agua puede moverse subsuperficialmente. Esta forma de fluir conduce al agua a acuíferos superficiales o bien a salir nuevamente del terreno (Bateman, 2007).

Ponce (2018), señala que los elementos de retención de agua del ciclo hidrológico son:

1. Atmósfera
2. Vegetación
3. Nieve y los casquetes polares
4. Suelo
5. Arroyos, lagos y ríos
6. Acuíferos
7. Océanos

Las fases de transporte del ciclo hidrológico son:

1. Precipitación pluvial
2. Escurrimiento
3. Derretimiento de la nieve y el hielo
4. Escurrimientos superficiales, de arroyos, y ríos a los océanos
5. Infiltración en la zona vadosa
6. Flujo del suelo a arroyos, lagos y ríos y viceversa
7. Percolación del suelo a los acuíferos
8. Ascenso capilar de los acuíferos para el suelo
9. Flujo de agua subterránea hacia arroyos, lagos, ríos, acuíferos, océanos y viceversa

Los principales factores que afectan al ciclo del agua son los climáticos; altitud, viento, la radiación solar que a su vez influye en la temperatura y la presión atmosférica que tiene

efecto sobre la humedad relativa (Bateman,2007). La figura 2, muestra el ciclo hidrológico.

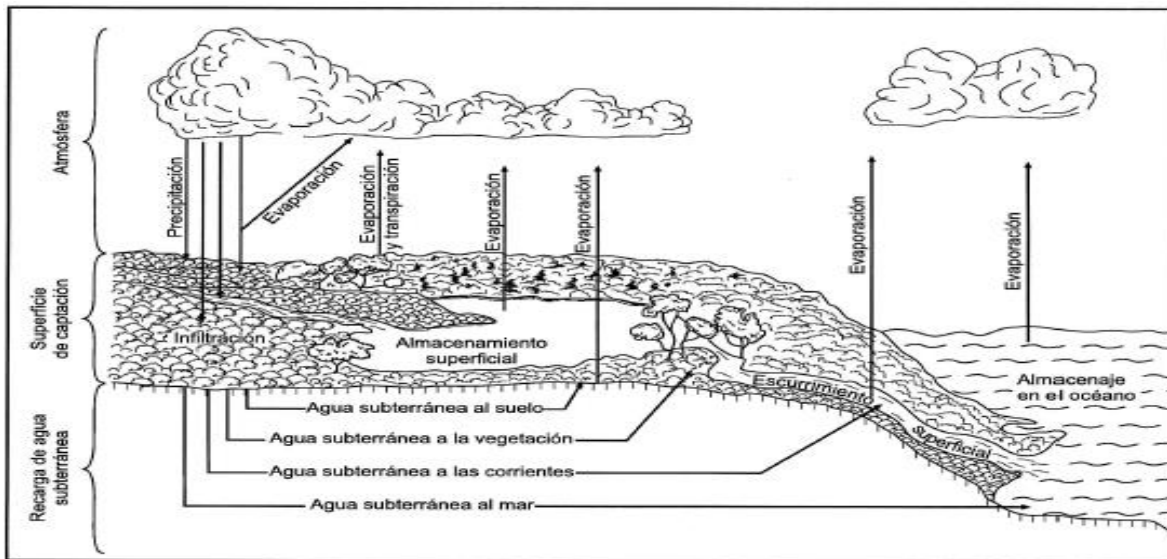


Figura 2. Proceso del ciclo hidrológico (Maderey y Jiménez, 2005).

I.1.3 Evaporación

Ordoñez (2011), define a la evaporación, como el proceso mediante el cual se convierte el agua líquida en estado gaseoso. El proceso de evaporación acontece solamente cuando el agua está disponible, de igual forma se necesita que la humedad de la atmósfera sea menor a su punto de saturación es decir al 100 % de humedad relativa no presenta evaporación como se observa en la figura 3.

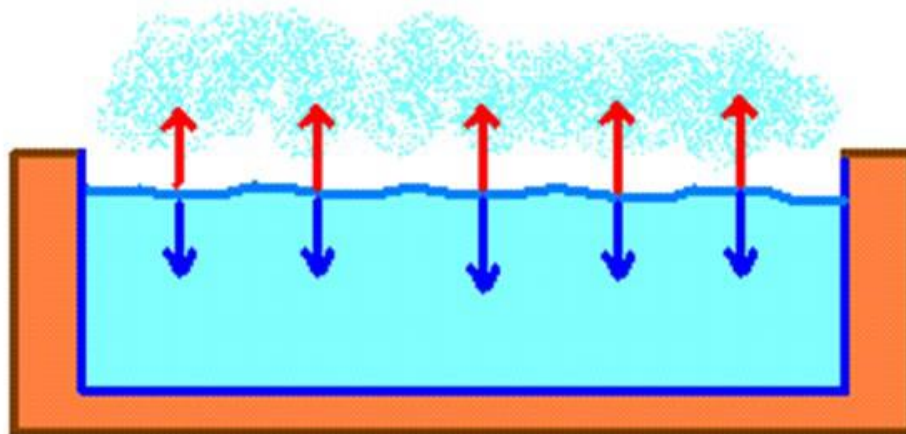


Figura 3. Evaporación (Musy, 2001).

Las fases de vapor-transporte del ciclo hidrológico son (Ponce, 2018):

1. Evaporación de la superficie terrestre, arroyos, lagos, ríos y océanos a la atmósfera
2. Transpiración de la vegetación a la atmósfera
3. Sublimación de las capas de nieve y de hielo a la atmósfera
4. Difusión del vapor del suelo a la superficie terrestre

Mejía (2006), menciona que la transferencia natural de evaporación se interpreta fácilmente por la teoría cinética de la materia. En los sólidos y líquidos las fuerzas de atracción son predominantes entre las moléculas del cuerpo; en los sólidos, cada partícula muestra oscilaciones alrededor de una posición media casi permanente, en cambio en los líquidos la energía cinética media de las partículas es mayor que en los sólidos, sin escape del conjunto. Las partículas de los gases con el aumento de energía cinética, se liberan y fluyen libremente. El proceso de cambio de un estado sólido a líquido para el cambio a estado gaseoso requiere un consumo de energía llamada calor de vaporización; en el fenómeno inverso, ocurre liberación de energía.

Simultáneamente con el escape de las partículas de agua hacia la atmósfera ocurre el fenómeno contrario: las partículas de agua en la fase gaseosa, chocan con la superficie de separación y son absorbidas por el cuerpo evaporante. El proceso de evaporación continúa hasta alcanzar un estado de equilibrio, que concierne a la saturación del aire en contacto con el agua: el número de moléculas que escapan (evaporan) es igual al número de moléculas que son absorbidas (condensan), en la misma fracción de tiempo. Raghunath (2006) resalta que los factores que afectan la evaporación son: la temperatura del aire, y del agua, la humedad relativa, la velocidad del viento, el área de la superficie, la presión barométrica y la salinidad del agua. El proceso de evaporación requiere grandes cantidades de energía. A medida que la temperatura y velocidad del viento aumenta, se presenta mayor incremento de evaporación.

I.1.4 Condensación

La condensación es un proceso físico, que altera únicamente a las propiedades físicas de la sustancia, provocando transformaciones reversibles, medibles y observables. La condensación sucede cuando el vapor de agua en la atmósfera se enfría creando el fenómeno de condensación que cambia el estado físico del agua en líquido como: cuando se toma una ducha caliente el vapor del agua que cambia la superficie del espejo, cambia de estado gaseoso a estado líquido mojando al espejo o, a bajas temperaturas, en cristales de hielo (Ponce, 2018).

I.1.5. Precipitación

Musy (2001), señala la precipitación a toda agua meteórica que desciende en la superficie de la tierra, en forma líquida (llovizna, lluvia), sólida (nieve, granizo) y las precipitaciones ocultas (rocío, helada blanca). Estas precipitaciones son provocadas por un cambio de temperatura o de presión. La precipitación constituye la única entrada principal de agua al sistema hidrológico continental. Mejia (2006), señala que la precipitación es una variante hidrológica que manifiesta más claramente su carácter aleatorio, variando drásticamente en el tiempo (variación temporal) y en el espacio (variación espacial). Es común que en un intervalo específico de tiempo, mientras que, en una zona o región ocurre una lluvia, en otra zona próxima no exista precipitación. Precisamente esta característica típica de la precipitación es la que introduce ciertas dificultades en su evaluación correcta. La unidad de medida utilizada es el milímetro, que se define como la cantidad de precipitación equivalente a un volumen de 1 L por metro cuadrado de superficie, también conocido como la lámina de agua o altura de lluvia depositada sobre esa superficie.

Para definir completamente una precipitación se requiere de tres parámetros: duración, intensidad y frecuencia. La duración (D) de una precipitación es el tiempo transcurrido entre el inicio y fin de la lluvia, la cual se expresa en h o min. La intensidad (I) se determina dividiendo la cantidad total de lluvia o lámina de agua, entre la duración. En términos conceptuales, la intensidad, se define como la cantidad de lluvia por unidad de

tiempo y puede variar de un momento a otro dentro de un mismo evento pluvial, la intensidad se mide en mm/h o mm/min.

Dado que es un proceso aleatorio, la probabilidad de ocurrencia de una lluvia con una intensidad específica se establece o define a través su frecuencia. Mientras que la saturación es una condición esencial para desbloquear la condensación. Los procesos termodinámicos son apropiados para realizar la saturación de las partículas atmosféricas inicialmente no saturadas y causar su condensación:

Los diferentes tipos de saturación y condensación del vapor de agua presentes en la atmósfera son los siguientes:

- a) Saturación isobárica (a presión constante),
- b) Saturación adiabática (por presión adiabática),
- c) Saturación por presión de vapor de agua,
- d) Saturación por mezcla y turbulencia.

Existen diferentes tipos de precipitación según la causa de la elevación del aire húmedo: precipitación por convección térmica, precipitación orográfica y precipitación frontal (Raghunath ,2006; Mejía, 2006), tal como se observa en la figura 4.

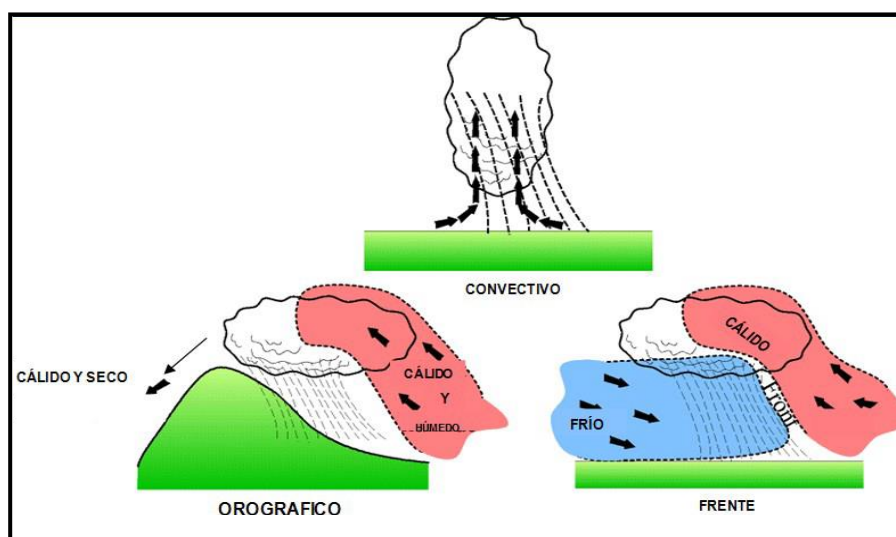


Figura 4. Precipitación por convección, orográfica y frontal. (Musy, 2001).

Precipitación por convección térmica

Este efecto surge debido al ascenso rápido de las masas del aire en la atmósfera. Cuando la atmósfera está en calma, el aire próximo al suelo es calentado por la radiación solar emitida por la superficie terrestre, es aire con mayor temperatura que el aire circulante, este se eleva en forma de células de convección, enfriándose adiabáticamente hasta alcanzar el nivel de condensación, como resultado se forman nubes que generan lluvias muy intensas, de duración cortas y abarcando áreas reducidas. Estas precipitaciones son características de las zonas ecuatoriales (Mejía, 2006). Se presentan en forma de tormentas eléctricas locales que finalmente estalla en una tormenta de truenos. Cuando se acompañan de vientos destructivos, se les llama "tornados". La precipitación que resulta de este proceso es generalmente tempestuosa, de corta duración (menos de una hora), de intensidad fuerte y de poca extensión (Ordoñez, 2011). En las regiones de clima templado, ocurren durante los períodos cálidos, en forma de tormentas de verano, localizadas y violentas.

Precipitación orográfica

El término orográfico proveniente del griego "oros", que significa montaña. Este tipo de precipitación se vincula con la presencia de una barrera topográfica. La característica de la precipitación orográfica depende de factores como: la altitud, la pendiente y la orientación, así mismo de la distancia que separa el origen de la masa del aire caliente del lugar de la elevación. En general, presentan una intensidad y una frecuencia regular (Raghunath, 2006).

Precipitación frontal o del tipo ciclónico

Se debe al levantamiento del aire húmedo que converge en un cinturón de baja presión, es decir, debido a las diferencias de presión creadas por el calentamiento desigual de la superficie terrestre. Aquí los vientos soplan en espiral hacia adentro en sentido antihorario en el hemisferio norte y en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur. Hay dos tipos principales de ciclones: el ciclón tropical (también llamado huracán o tifón) de un diámetro comparativamente pequeño de 300-1500 km que causa una alta

velocidad del viento y fuertes precipitaciones, y el ciclón tropical extra de gran diámetro de hasta 3000 km que causa una amplia propagación frontal. (Raghunath, 2006).

Debido a la diferencia de presión y a otras causas relacionadas con la circulación global de la atmósfera, las masas de aire pueden comenzar a desplazarse a través de grandes distancias. Durante su desplazamiento (por ejemplo, del polo hacia el ecuador) encuentran otras masas que pueden tener características diferentes, que entran en choque, estableciendo una superficie de contacto que puede visualizarse como un plano inclinado que parte del suelo y se eleva en la atmósfera. Un frente meteorológico (movimiento ciclónico), es representado en los mapas sinópticos de previsión del tiempo. En el choque o encuentro, las masas calientes y húmedas (más ligeras) son proyectadas hacia arriba, lo que provoca su enfriamiento y generación de precipitaciones del tipo frontal. Estas precipitaciones generalmente suelen ser importantes y prolongadas. Naturalmente, con frecuencia una lluvia real puede tener una o varias de las causas mencionadas, y una perturbación ciclónica puede ser el origen de una precipitación orográfica y acentuar las lluvias de tipo convectivo (Mejía, 2006).

I.1.6. Infiltración

La infiltración es el proceso cuando el agua se mueve de la superficie hacia el subsuelo Chow et al., (1994). La infiltración es el flujo del agua a través de las diversas capas permeables del suelo, cuya función principal es evitar la erosión de los suelos, nutrir las plantas y evitar posibles inundaciones. Los principales factores que conciernen a la infiltración del agua son: las características del suelo, su capacidad para infiltrar, almacenar y traspasar o conducir el agua, así como de los diferentes agentes externos causados por la actividad humana y que afecten el ciclo hidrológico. En general, la tasa de infiltración depende de muchos factores, como intensidad y tipo de precipitación, condiciones de la superficie del suelo, densidad, tipo y estado de desarrollo de la vegetación, temperatura y composición química del agua, propiedades físicas del suelo, tales como la porosidad, tamaño de los poros, contenido de humedad, entre otras (FAO, 2019).

Las disminuciones de la tasa de infiltración ocurren cuando el suelo se satura. Se produce escorrentía cuando la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración. La tasa de infiltración está relacionada con la conductividad hidráulica saturada de la zona vadosa del suelo (Raghunath, 2006). Se conoce como tasa de infiltración a la velocidad de flujo de agua a través de un suelo saturado, calculada como el cociente del volumen de agua que fluye a través de una unidad de área del material del suelo por unidad de tiempo (m/día). El coeficiente de permeabilidad de un suelo es la velocidad de filtración del agua en el suelo saturado, con pérdida de carga unitaria; por lo tanto, las unidades son las mismas (m/día) (Mejía, 2006).

Medición de la infiltración

La unidad de medida se da en altura de agua infiltrada, es decir en milímetros (mm). Se han desarrollado diversas técnicas e instrumentos para medir la infiltración de agua en el suelo, el infiltrómetro de doble anillo es una de estas técnicas, Así también, se han formulado diversos modelos para describir el proceso y calcular la tasa de infiltración del suelo. Los modelos se pueden clasificar en teóricos y empíricos. Los primeros son los modelos de Green-Ampt y Philip, y los modelos empíricos son los de Kostiaikov, Horton, Mezencev y USDA-NRCS (Li *et al.*, 2019).

Factores que afectan la infiltración

La velocidad con la que penetra el agua del exterior al interior del suelo depende de diversos factores como:

EL contenido de humedad del suelo, cuanto mayor sea el contenido de humedad, menor será la velocidad de infiltración.

La permeabilidad del suelo: La calidad de la estructura física del suelo facilita o dificulta el movimiento de agua en su interior, aumentando o disminuyendo, respectivamente, la velocidad con la cual el suelo puede recibir nuevas cantidades de agua.

El tipo de poros del suelo: Depende de la predominancia de los poros, sí el suelo prevalece de poros finos, la infiltración será menor; debido a que este tipo de de poros puede estar relacionado con texturas finas y/o poco desarrollo estructural, así como con problemas de compactación.

La homogeneidad del suelo: Los suelos de perfil homogéneo presentan una alta continuidad en el espacio poroso, la cual facilita el movimiento del agua y su infiltración en el suelo; cuando hay presencia de contrastes texturales y estructurales en el interior del suelo, éstos pueden ocasionar interrupciones en los poros, o reducciones rigurosas en el tamaño de ellos que desaceleran el flujo del agua y la infiltración.

Las condiciones superficiales del suelo: La formación de una capa de sellamiento y/o encostramiento en la superficie del suelo puede provocar una disminución en la infiltración.

La textura del suelo: es la propiedad que indica el contenido relativo en que se encuentra las partículas de diámetro menor a 2 mm, La textura es aquella propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm, es decir, la tierra fina, en el suelo; estas partículas, llamadas separados, se agrupan en tres clases, por tamaños: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar). Jaramillo, (2002).

I.1.7. Cuenca hidrográfica

La palabra cuenca es definida como el área geográfica natural o unidad de territorio delimitada por una divisoria topográfica, que capta las precipitaciones y drena el agua de escorrentía hacia un colector común, denominado río principal, esta área contribuye al escurrimiento directo y proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios (Ordoñez, 2011). Prieto (2009), menciona que una cuenca hidrográfica es una unidad o región geográfica que se delimita por un parteaguas o territorio cuyas aguas fluyen todas hacia un mismo río, lago o mar y se encuentran conectados de tal forma que todo escurrimiento originado en el área se descarga en un punto.

Por otro lado, una cuenca hidrográfica es una región de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por un sistema de corrientes naturales conducidas hacia un mismo punto de salida. Es decir, es una especie de “embudo” del territorio por el que escurre el agua desde las partes altas, hasta llegar a un punto en común, de donde sale toda el agua que fluye hacia otro lado. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019). Vásquez *et al.* (2016), definen que una cuenca hidrográfica es un sistema abierto a flujos, influencias y líneas de acción

que atraviesan sus fronteras; es decir, que puede recibir y dar; una cuenca hidrográfica es sólo una parte infinita de la tierra, se debe considerar que no existe ningún punto de la tierra que no pertenezca a una cuenca hidrográfica.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019) indica que se entiende por cuenca hidrográfica la porción de territorio drenado natural, que se define por la sección del río al cual se hace referencia y es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada “divisor de aguas”. Una cuenca incluye ecosistemas terrestres (selvas, bosques, matorrales, pastizales, manglares, entre otros) y ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, humedales, etc.), y sus límites se establecen por el parteaguas desde donde escurre el agua que se precipita en el territorio delimitado por éste, hasta un punto de salida” (Ordoñez, 2011).

Se distinguen por lo general tres sectores característicos: alto, medio y bajo, los cuales en función a las características topográficas del medio pueden influir en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos (Llerena, 2003). Arreola-Muñoz (s/f), plantea que “el funcionamiento de las cuencas es de manera territorial altitudinal, porque se ve implicada una conexión directa entre las zonas altas, cercanas a la divisoria de aguas, la región de tránsito o intermedia y la inferior donde ocurre la deposición y desembocadura. Esta relación entre las diferentes altitudes y regiones de la cuenca significa que las áreas elevadas influyen de manera significativa en las áreas más bajas.

Plan de Acción de Manejo Integral de Cuenca (PAMIC, 2017), en específico refiere que una cuenca alta corresponde al área donde nace o inicia el río, y donde este fluye por una gran pendiente, la cuenca media es la parte donde se establece un equilibrio entre el material sólido que llega a través de la corriente y el material que sale. Se dice que no se observa una erosión de esta región y finalmente, una cuenca baja es donde los materiales transportados de la parte alta se depositan en lo que se le llama cono de deyección. La zonificación altitudinal se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Zonificación altitudinal de la cuenca del río Jamapa (PAMIC, 2017).

Zonificación altitudinal de la cuenca			
Zona	Función principal	Superficie	
		km ²	%
Cuenca alta	Captación	786	20
Cuenca media	Acumulación y transporte	1776	45
Cuenca baja	Descarga	1355	34

Cuando una cuenca hidrográfica tiene una o más salidas de agua que desembocan en un cuerpo de agua mayor como, un lago o al mar, se dice que es “abierta” o “exorreica” (En México, por ejemplo: Lerma, Balsas, Bravo, Pánuco, Grijalva, Usumacinta, Yaqui, forman parte de cuencas exorreica). Si la cuenca no tiene salida, se califica como “cerrada” o “endorreica” y por lo general da origen a un lago, si la impermeabilidad del suelo se lo permite (En México, por ejemplo: Cuenca del Valle de México y el lago de Pátzcuaro, en Michoacán). Las cuencas denominadas “criptorreicas” presentan un flujo subterráneo de agua, como sucede en la península de Yucatán (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019). El mismo Instituto señala que las cuencas arréicas son aquellas en las cuales las aguas se evaporan o filtran en el terreno antes de fluir a través de una red de drenaje. Los arroyos y riachuelos son ejemplos de cuencas arréicas, ya que no desembocan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico de importancia.

Dentro de los términos que generalmente se utilizan, para definir e identificar los componentes que identifican las características de una cuenca tenemos: cuenca, subcuencas, microcuencas (Figura 5), quebradas, cuenca alta, cuenca media, cuenca baja o zonas transicionales, zona de cabecera, zona de captación-transporte, zona de emisión, divisoria de aguas, río principal, afluentes y efluentes. Donde la subcuenca es una agrupación de microcuencas que convergen a un solo cause con flujo que puede variar pero se mantiene constante, mientras que una microcuenca es toda área en la que su drenaje se dirige hacia el cauce principal de una subcuenca; es decir, una subcuenca está dividida en varias microcuencas. Quebrada, es toda área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una microcuenca (Ordoñez, 2011).

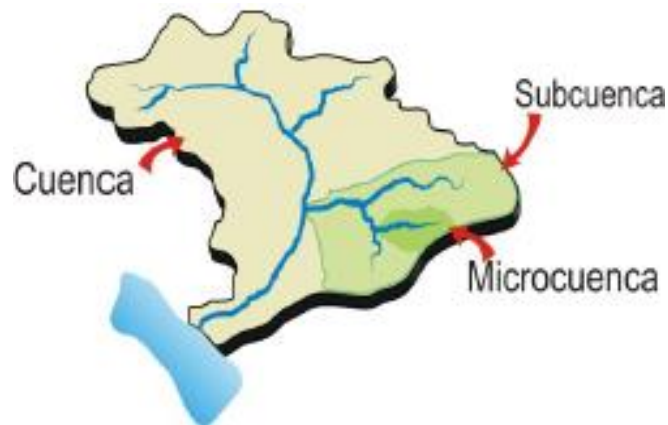


Figura 5. Cuenca, subcuenca y microcuenca. Adaptado por Casaverde, 2011, en (Ordoñez, 2011).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019) delimita a la subcuenca como ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada fuente cuenta con su respectiva cuenca, denominada subcuenca, se considera que una subcuenca abarca un territorio entre cincuenta mil y cinco mil hectáreas. Sing (1989) define a la subcuenca como unidad de menor superficie que una cuenca y que forma parte de ésta, constituyendo un tributario de esta, dando a entender que es una cuenca que sale o drena a una cuenca más grande. La microcuenca la definen el conjunto de afluentes que fluyen hacia los ríos secundarios, por ejemplo: cauce, quebradas, riachuelos que desembocan y alimentan a los ríos secundarios. Las microcuencas cubren una superficie entre cinco mil y tres mil ha, y cuando las condiciones orográficas lo permiten hay microcuencas menores a tres mil ha (SEMARNAT, 2003).

I.1.8. Cuenca hidrológica río Alto Atoyac

La cuenca hidrológica Río Alto Atoyac (Figura 6) abarca los estados de Tlaxcala con 52 municipios, Puebla con 28 municipios y Estado de México con 4 municipios. Este territorio forma parte de la cuenca hidrográfica Río Balsas, en la región hidrológica y administrativa RH 18. Tiene una extensión aproximada de 4.001.66 km² y un perímetro de 364.74 km, la altitud máxima es de 5 200 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) en el volcán Iztaccíhuatl; la mínima es de 2 016 m s.n.m en la cortina de la presa Manuel Ávila Camacho. Las regiones de la Malinche y Sierra Nevada se encuentran parcialmente dentro de la cuenca Informe técnico, Río Alto Atoyac Humedales (INEGI, 2019).

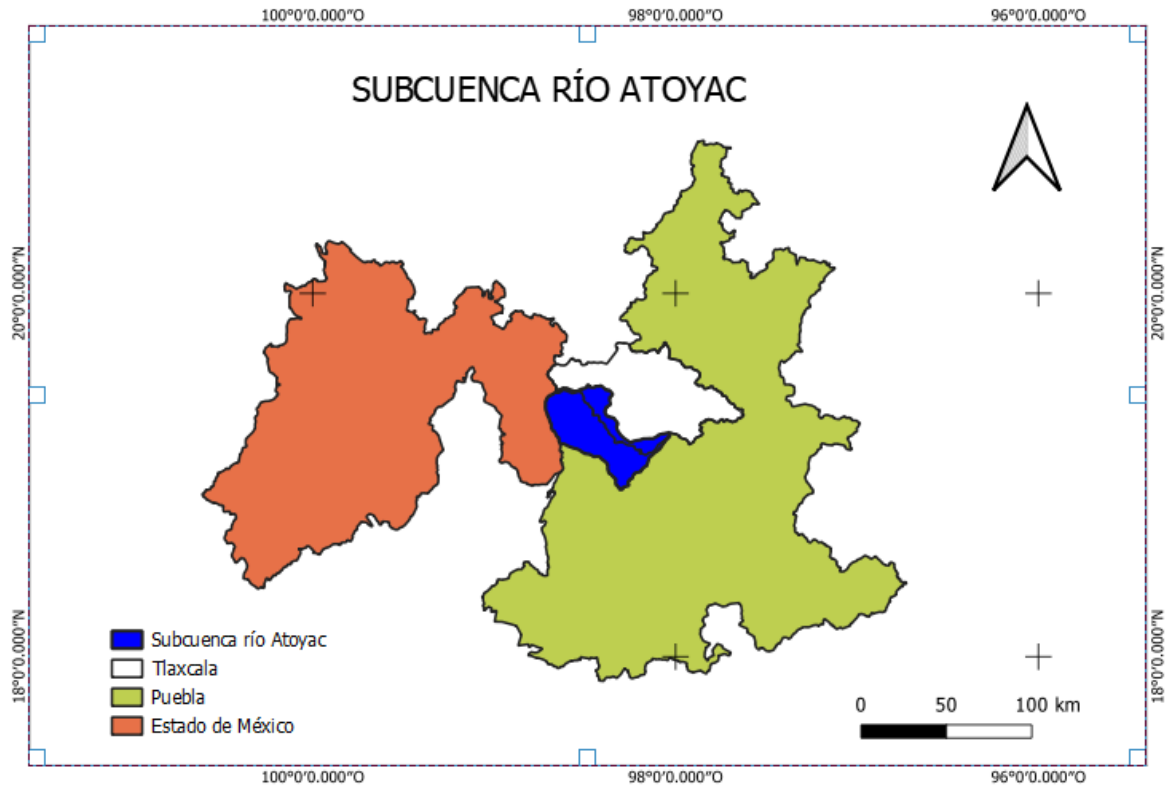


Figura 6. Cuenca Alto Atoyac (Elaboración propia).

I.1.9. Balance de agua

El balance de agua o balance hídrico es el análisis de la composición y funcionamiento de las cuencas superficiales y subterráneas, cuerpos de agua y ríos, es importante la realización de ello para la gestión del agua en el espacio y el tiempo. A partir del balance hídrico es posible realizar una evaluación cuantitativa del recurso agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre (Rosales, 2012). El balance de agua se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$P + G_i = E + E_t + G_0 + SMA + G_r + R \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P = Precipitación pluvial (mm)

G_i = Flujo de entrada subterránea (mm)

E = Evaporación (mm)

E_t = Evapotranspiración (mm)

G_0 = Flujo de salida subterránea (mm)

SMA = Humedad del suelo (mm^3/mm^3)

G_r = Recarga de acuífero (mm)

R = Escorrentía superficial (mm)

La deficiencia de agua obtenida en estudios de balance hídrico indica la cantidad de agua necesaria para riegos suplementarios en operaciones agrícolas, ajuste del calendario de cultivo (para que la cosecha preceda a la sequía) y rotación de cultivos para mejorar la estructura del suelo y aumentar el almacenamiento de humedad del suelo (Raghunath, 2006).

Balance hídrico en cuencas

Los componentes o elementos que se utilizan para la estimación del balance hídrico están de acuerdo al tipo de cuenca.

- 1) Componentes del balance hídrico de una cuenca tipo vertiente (Figura 7).



Figura 7. Cuenca tipo vertiente (Rosales, 2012).

El balance de agua en una cuenca tipo vertiente se establece por medio del siguiente modelo:

$$P_p - Q_e - DR - Evtr = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

P_p = Precipitación pluvial (mm)

Q_e = Caudal del efluente (mm)

DR = Variación del contenido de agua del suelo (mm)

$Evtr$ = Evapotranspiración (mm)

2) Componentes del balance hídrico de una cuenca tipo lacustre (figura 8)



Figura 8. Cuenca lacustre (Rosales, 2012).

El balance de agua en una cuenca tipo lacustre se establece por medio del siguiente modelo:

$$P_p - Q_e - Ev - DC - DR - Evtr = 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

P_p = Precipitación (mm)

Q_e = Caudal del efluente

Ev = Evaporación de los cuerpos de agua (mm)

DC = Variación del volumen del cuerpo de agua (mm)

DR = Variación del contenido de agua del suelo (mm)

$Evtr$ = Evapotranspiración (mm)

3) Componentes del balance hídrico de una cuenca lacustre con afluente (Figura 9)



Figura 9. Cuenca lacustre con afluente (Rosales, 2012).

El balance de agua en una cuenca tipo lacustre con afluente se establece por medio del siguiente modelo:

$$P_p - Q_a - Q_e - Ev - C - R - Evtr = 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

P_p = Precipitación (mm)

Q_a = Caudal del afluente

Q_e = Caudal del efluente

Ev = Evaporación de los cuerpos de agua (mm)

C = Variación del volumen del cuerpo de agua (mm)

R = Variación del contenido de agua del suelo (mm)

$Evtr$ = Evapotranspiración divisoria de las aguas (mm)

4) Componentes del balance hídrico de una cuenca tipo endorreica (Figura 10)



Figura 10. Cuenca endorreica (Rosales, 2012).

El balance de agua en una cuenca tipo endorreica se establece por medio del siguiente modelo:

$$P_p - Ev - C - R - Evtr = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

P_p = Precipitación (mm)

Ev = Evaporación de los cuerpos de agua (mm)

C = Variación del volumen del cuerpo de agua (mm)

R = Variación del contenido de agua del suelo (mm)

$Evtr$ = Evapotranspiración (mm)

I.2 Antecedentes

I.2.1. Balance hídrico

Suárez *et al.* (2009), analizaron el impacto del cambio climático global y el crecimiento poblacional en el balance de agua de la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala y evaluaron acciones de mitigación ante estas modificaciones usando un modelo de simulación en WEAP (Water Evaluation and Planning System). Calcularon el escurrimiento, la evapotranspiración e infiltración representados mediante un nodo de área de captación, con el método de escurrimiento de la FAO (Stockholm Environment Institute-Boston Tellus Institute, 2005). Los datos de la precipitación pluvial los obtuvieron de los registros de cuatro estaciones climatológicas de la red de la CONAGUA, los de evapotranspiración los calcularon por medio del método de Thornthwaite (Torres 1995). Como resultado mostraron que en la subcuenca se captan 779.6 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, de los cuales 65% de agua se evapotranspiran, 30% se escurren superficialmente y 5% se infiltran en el suelo; calcularon que el consumo anual de agua fue de 40.2 millones de m^3 , de los cuales 80% se destina para uso doméstico y 20% para agricultura de riego. Pronosticaron que la disponibilidad del agua per cápita alcanzaría el valor de $873.77 \text{ m}^3 \text{hab}^{-1} \text{año}^{-1}$ (2015). Concluyeron que es necesario llevar a la práctica acciones como reforestación, empleo del uso de agua residual tratada, optimización del uso del agua y la promoción de una cultura de uso racional del agua, entre otras acciones.

Lesser *et al.* (2011), realizaron un estudio de balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del valle del Mezquital, México, para lo cual realizaron un estudio geohidrológico de actualización en el acuífero del valle del Mezquital, diferenciaron dos horizontes, que no se habían detectado en estudios previos, uno superficial y otro profundo. El análisis del balance de aguas subterráneas señaló que la principal entrada de agua al acuífero del valle del Mezquital corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar, que provienen de la Ciudad de México, que ingresan a través de canales y retornos de riego. Las descargas de agua del acuífero los calcularon a través de manantiales que descargan al río Tula. Otra parte, del agua, es extraída por pozos mientras que el resto fluye hacia el norte y noreste, tanto en forma de flujo superficial (drenado por el río Salado), como subterránea. En el año 2007 las

mediciones para nivel estático fueron de 10 y 40 m de profundidad con un flujo de agua subterránea de sur a norte, el cálculo del balance del agua subterránea reflejó los siguientes resultados: las entradas subterráneas son de 10.6 Mm³/año, la infiltración es de 165 Mm³/año, la extracción alcanza 97.7 Mm³/año, las salidas de agua subterránea equivalen a 71.7 Mm³/año, no se registró un cambio significativo de almacenamiento y la evapotranspiración es de 6.1 Mm³/año. En cuanto a calidad del agua realizaron análisis fisicoquímicos, en 65 pozos, los resultados fueron comparados con la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) y determinaron que el sodio y los sólidos totales disueltos generalmente se encuentran por arriba del límite máximo permisible para agua de uso y consumo humano. Además, identificaron presencia de arsénico, fluoruros y plomo en diferentes pozos con concentraciones que superan el límite máximo permisible. En treinta de los 75 pozos de agua potable analizados bacteriológicamente, detectaron coliformes totales y en varios de ellos coliformes fecales.

Muñoz *et al.* (2018), realizaron la cuantificación del balance hídrico mediante un lisímetro, midieron las precipitaciones pluviales con un pluviómetro. El contenido de agua del suelo (SWC) y la infiltración los midieron en el LCL, que estaba al aire libre, en una ladera del volcán La Malinche. Calcularon la evaporación con la ecuación del balance hídrico. Para evaluar la eficiencia de LCL, registraron mediciones durante dos años (2015-2016). La distribución de los datos de lluvia la evaluaron mediante la prueba de Kolmogórov-Smirnov. Utilizaron la prueba de Mann-Whitney (M-W) para comparar la lluvia, el SWC y la infiltración durante los dos años. Mediante el software HYDRUS-1D simularon el almacenamiento de agua del suelo (SWS) del LCL. La eficiencia de HYDRUS-1D se evaluó con la prueba Nash-Sutcliffe (N-S). Como resultados obtuvieron que la precipitación anual total fue de 992.1 mm para 2015 y 1025.1 mm para 2016. La prueba K-S mostró que los datos de lluvia tuvieron una distribución exponencial en ambos años. La prueba M-W evidenció que la lluvia, el SWC y la infiltración no fueron significativamente diferentes ($p > 0.05$) para los dos años. La infiltración de agua de lluvia fue del 6.4% para 2015 y del 5.9% para 2016. La mayor parte de la lluvia se evaporó, alcanzando porcentajes cercanos al 94%. La prueba N-S mostró una buena simulación del LCL por el software HYDRUS-1D. El balance hídrico indicó que actualmente el área

de recarga de La Malinche es insuficiente para compensar el consumo de agua de Puebla y Tlaxcala.

I.2.2 Tasa de infiltración

Gómez *et al.* (2014), realizaron la evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas, con la finalidad de evaluar y determinar la mayor tasa de infiltración en relación al uso del suelo en la subcuenca del río Shullcas en Huancayo, Perú. Identificaron y delimitaron los usos actuales de la tierra, conforme a la normativa peruana de clasificación de tierras por su capacidad de uso principal; en estas áreas se seleccionaron aleatoriamente 32 puntos de muestreo utilizando las herramientas de software ArcGIS. Estos puntos de muestreo los distribuyeron de la siguiente manera: 7 para tierras agrícolas, 6 para tierras forestales y 19 para tierras de pastoreo, en donde se midió la infiltración de agua con el equipo de infiltrómetro metálico de doble anillo; igualmente registraron los tipos de cobertura vegetal y tomaron muestras de suelo para analizar el contenido de arcilla, arena, limo y humedad; también evaluaron la densidad aparente y porosidad. Los resultados que obtuvieron reveló que las tasas de infiltración promedio varían, de acuerdo al tipo de uso de suelo, los cuales fueron: para suelos forestales, la tasa promedio fue de 14.04 cm/h; mientras que para las suelos agrícolas fue de 12.42 cm/h y para suelos de pastoreo fue de 2.07 cm /h. Además, solo el 12.63 % de la subcuenca del río Shullcas mostró infiltración mayor a 0.2 cm/h. Concluyeron que no encontraron diferencia estadística significativa entre la tasa de infiltración de suelos forestales y agrícolas. Sin embargo, encontraron diferencias de la tasa de infiltración de tierras forestales y agrícolas, con respecto a la tasa de infiltración de suelos de pastoreo.

Lozano *et al.* (2020), calcularon la infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México, con el objetivo de estimar la infiltración acumulada (F), tasa de infiltración básica (Ti), tasa de infiltración constante (fc) y coeficiente de decaimiento (k); así como los coeficientes de infiltración y escurrimiento en suelos del bosque mesófilo de montaña (BMM), selva mediana subperennifolia asociada con café bajo sombra (SMSPC), bosque de pino encino (BPQ), bosque de encino (BQ), pastizal inducido (PI),

bosque de pino (BP), tierra de cultivo en uso (TC) y tierra de cultivo en descanso (TCD). Llevaron a cabo 38 experimentos de lluvia simulada con una intensidad media de 100 mm h⁻¹ utilizando un simulador tipo mono vertedor trípode. Utilizaron el modelo exponencial para estimar f_c y k , y el modelo semi empírico de Horton para estimar T_i y F . El análisis de varianza lo realizaron con el modelo lineal general (GML) para los efectos de USV y clase textural, análisis de covarianza para estudiar los efectos de pendiente del suelo, profundidad de mantillo, contenido de materia orgánica; contenido de arena, limo y arcilla y densidad aparente. El modelo exponencial ajustó más del 80% de la variabilidad total (R^2) en todos los USV. Las TC y TCD mostraron la menor F y T_i , con el mayor k ($P < 0.001$), el BMM mostró la mayor capacidad de infiltración (F) y menores tasas de decaimiento (k). Las variables asociadas positivamente con la infiltración ($P < 0.01$) fueron la densidad aparente del suelo, contenido de limo y materia orgánica. Concluyeron que la variabilidad de los parámetros de infiltración resultó alta para las tierras de cultivo y en descanso, para el bosque de pino y la selva mediana subperennifolia asociada con café. Los suelos francos del bosque mesófilo de montaña presentaron la mayor capacidad de almacenaje de agua con tasas lentas de decaimiento; lo cual evidencia la importancia de estas formaciones vegetales para mantener servicios hidrológicos de alto significado, ya que concurren la asociación de doseles arbóreos y suelos francos. El contenido de limo y materia orgánica pudieran estar favoreciendo las condiciones del suelo, para una mayor tasa de infiltración en condiciones de no roturación agrícola; pero es evidente, que el incremento de los volúmenes de escurrimiento y la disminución de la capacidad infiltración, se pueden producir también en los suelos de textura franca, cuando son intervenidos por la práctica de la agricultura independientemente del tipo de vegetación existente.

I.3 Pregunta de investigación

¿Cuál es la relación de la infiltración de agua en el suelo en una microcuenca del río Atoyac Valle de Puebla-Tlaxcala, con la textura del suelo y la temperatura?

I.4 Hipótesis

La infiltración de agua en el suelo está influenciada por la textura del suelo y la temperatura, para el caso de una microcuenca del río Atoyac, Valle de Puebla-Tlaxcala.

I.5 Justificación

El agua es un recurso no renovable, el cual se agota, ya que el hombre la utiliza para diferentes actividades industriales, agrícolas, ganaderas y domésticas, no obstante, las actividades antrópicas como la contaminación, el aumento de la población, la tala y deforestación son factores que ocasionan la disminución del recurso hídrico. Una situación de este tipo es insostenible a largo plazo, ya que provoca que se deterioren los ecosistemas o se pierdan más servicios ecosistémicos no sólo los hídricos, la consecuencia de esto será un ciclo hidrológico alterado, con una menor recarga del acuífero y, por tanto, una menor disponibilidad en la microcuenca de Nativitas, debido a que en esta zona de la microcuenca la población se dedica a las actividades de ganadería y agricultura. Por lo que es indispensable estudiar la infiltración de agua en el suelo, lo que aportará conocimientos en relación a la recarga del acuífero y por lo tanto de la disponibilidad de agua, en una microcuenca del río Atoyac para las diferentes actividades económicas del municipio de Nativitas; tales como, agrícola y ganadera, así como para la población, de esta manera se contribuirá con la sustentabilidad del recurso hídrico en la microcuenca.

I.6 Objetivos

I.6.1 General

Medir la infiltración de agua en el suelo en una microcuenca del río Atoyac Valle de Puebla-Tlaxcala, y su relación con la textura del suelo y la temperatura.

I.6.2 Específicos

1. Determinar las constantes de la ecuación de Horton, y modelar la tasa de infiltración.
2. Comprobar el modelo de Horton, mediante el coeficiente de correlación de los datos medidos y obtenidos con el modelo.

3. Determinar la relación de las constantes de Horton con la textura y temperatura del suelo.
4. Medir la infiltración de agua en el suelo empleando un lisímetro.

II METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El municipio de Nativitas se encuentra entre los paralelos 19° 10' y 19° 17' de latitud norte; los meridianos 98° 23' de longitud oeste; altitud entre 2 200 y 2 300 (m s.n.m). Pertenece a la región hidrológica Balsas (RH 18). Cuenca río Atoyac, subcuenca río Atoyac – San Martín Texmelucan. El 77% de la superficie cuenta con un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media, y el 23% con lluvias en verano, de mayor humedad. El 76.74% de la superficie municipal es utilizada para la actividad agrícola (INEGI, 2005).

Para delimitar el área de estudio de la subcuenca de la cuenca del alto Atoyac, se realizó mediante el uso de cartografía con el uso del programa QGIS (Figura 11).

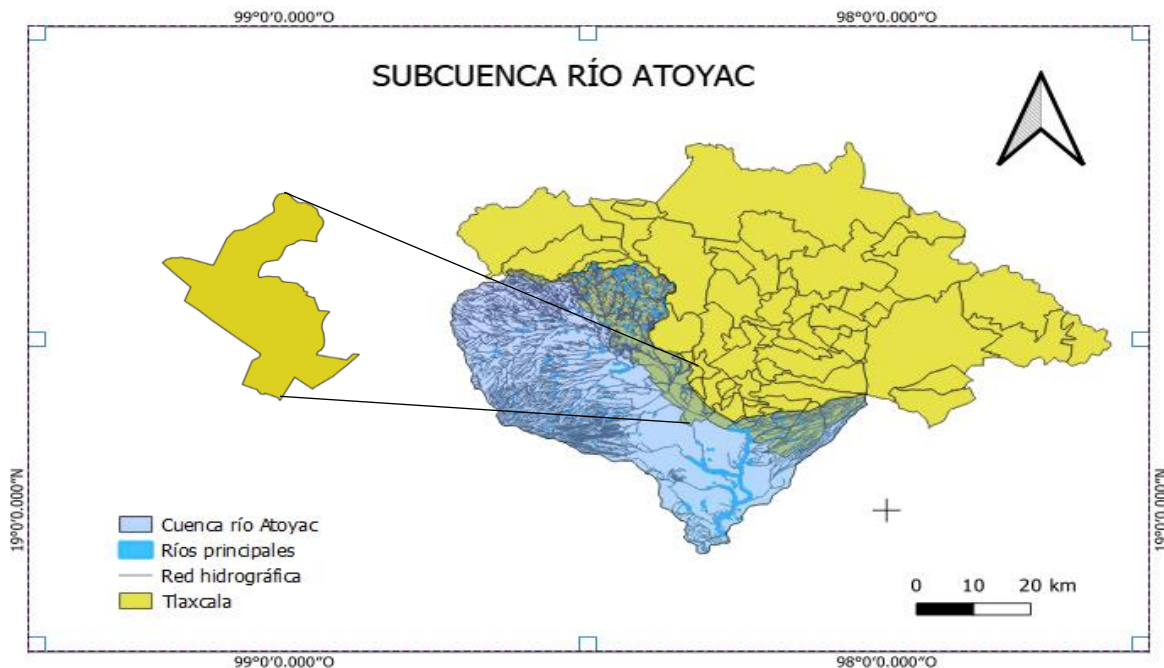


Figura 11. Subcuenca río Atoyac. Elaboración propia.

2.2 Aplicación de encuestas

Para conocer el historial de la labranza y cultivos sembrados que se realizan en las parcelas de los sitios donde se midió la infiltración, se aplicaron a los propietarios encuestas mediante entrevista presencial directa. La encuesta se encuentra en el anexo VII.

2.3 Medición de la infiltración *in situ* con doble anillo

La infiltración de agua en el suelo se midió en dos sitios: el primer sitio está ubicado en los ejidos de Santo Tomás La Concordia, y el segundo en San Rafael Tenayecat. Estos sitios se encuentran en la microcuenca de Nativitas (Figura 12). Las mediciones de infiltración se realizaron con un infiltrómetro de doble anillo, el cual está descrito en la norma establecida por la American Society for Testing Material (ASTM D3385, 1994). En esta norma se describe que el infiltrómetro consiste en dos cilindros de aproximadamente 500 mm (20 pulgadas) de altura y diámetros de aproximadamente 300 mm y 600 mm (12 y 24 pulgadas). Se pueden utilizar cilindros más grandes, siempre que la relación entre los cilindros internos y externos sea aproximadamente dos. Los cilindros pueden estar hechos de un calibre de 3 mm (1/2 pulgada), aleación dura, lámina de aluminio, acero inoxidable, plástico resistente u otro material lo suficientemente resistente para soportar golpes al hincarlos. El borde inferior está biselado, para dar filo, facilitar el corte y la penetración en el suelo.

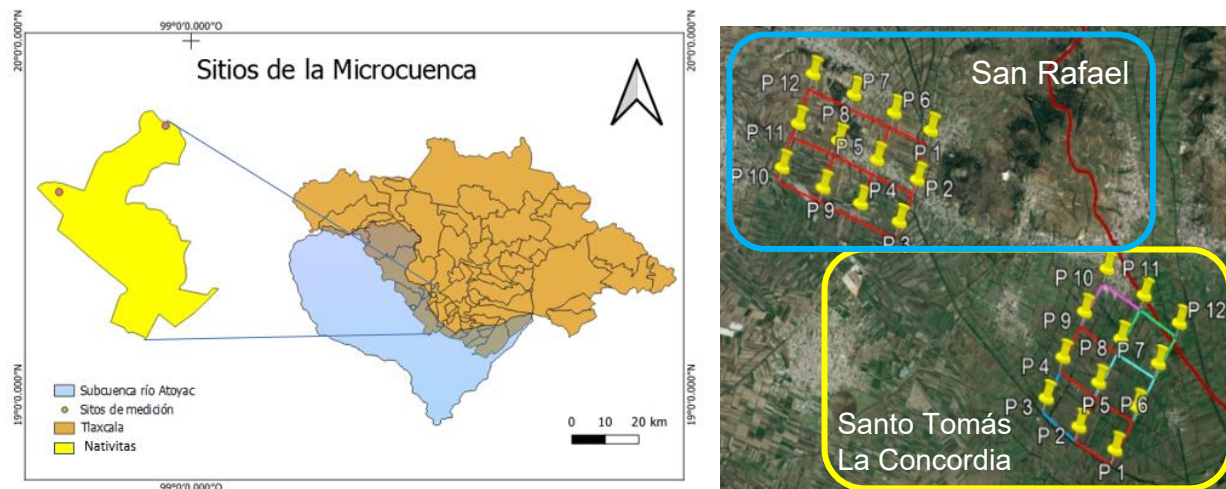


Figura 12. Sitios de medición con infiltrómetro de doble anillo.

2.3.1 Selección de los puntos de medición de la infiltración

Para seleccionar los puntos de medición de la infiltración en las parcelas, se hizo una cuadrícula virtual en QGIS, como se muestra en la (Figura 12). La cuadrícula se trazó de tal manera que cada celda cuadrada tuviera un kilómetro cuadrado de área. En los vértices de cada celda se realizó la medición de infiltración. En total se seleccionaron 12 puntos de medición por cada sitio.

2.3.2 Medición de la infiltración

Se realizó una limpieza de hojas secas en cada punto de medición, se comprobó que no existieran raíces o piedras debajo de los anillos, se registró la humedad y temperatura del suelo, así como la del ambiente (Figura 13). Se aseguró que el anillo interno se encontrara en el centro con respecto al anillo exterior (Figura 14). Posteriormente se procedió a hincar los anillos en el suelo golpeando con un mazo. Ambos anillos se introdujeron 15 cm en el suelo, procurando que estuvieran nivelados para evitar el flujo lateral de agua (Figura 15).



Figura 13. Registro de humedad y temperatura del suelo. **Figura 14.** Anillo interno colocado en el centro respecto al anillo externo. **Figura 15.** Anillos hincados.

Una vez que se hincaron los anillos, se colocó agua a ambos simultáneamente. Al momento del llenado se evitó que el agua cayera de golpe al suelo y así evitar la desagregación de las partículas. Se verificó que no existiera fuga de agua que pueden

ser provocadas por la presencia de raíces o piedras, en el caso de que se presente uno de estos dos casos se recomienda taparlo con suelo.

Se mantuvieron los niveles del agua iguales en ambos anillos, de otra manera, si el del anillo exterior es mayor que el nivel de agua del anillo interior el agua tenderá a moverse hacia el centro, produciéndose así errores de lectura y se generarían datos erróneos.

El método consiste en tomar lecturas del descenso del nivel del agua en el anillo interno respecto a intervalos tiempo determinados. La medición de infiltración en los puntos de los sitios se realizó a la misma hora.

Cuando el nivel de agua del anillo interior bajó, se agregó más agua para elevar la columna de agua y continuar la medición. Cuando el descenso del nivel de agua en el cilindro interior fue constante en tres intervalos de tiempo también constantes, es decir, cuando se alcanzó una tasa de infiltración constante en tres lecturas, se dio por terminada la medición (Figura 16).



Figura 16. Medición de infiltración con infiltrómetro de doble anillo.

2.3.3 Análisis de datos de las mediciones de infiltración

El análisis de datos de los cambios de nivel de agua, en el anillo interior, con respecto al tiempo, se realizó utilizando el modelo de Horton (Raghunath, 2006). el cual se escribe como:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$$

Ecuación 6

Donde:

f = tasa de infiltración (cm/hr)

f_c = valor cuando la tasa de infiltración es constante (cm/hr)

f_o = valor de la tasa de infiltración en $t = 0$ (cm/hr) o infiltración inicial

k = constante de infiltración (1/hr)

t = tiempo (hr)

La constante de infiltración (k) se calcula con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{f_o - f_c}{F_c}$$

Ecuación 7

Donde:

F_c = Área bajo la curva, con unidades en cm, que indica la cantidad de agua que se infiltró hasta alcanzar el valor de f_c .

La (Figura 17), describe gráficamente el modelo de Horton y su ubicación de las constantes en la misma.

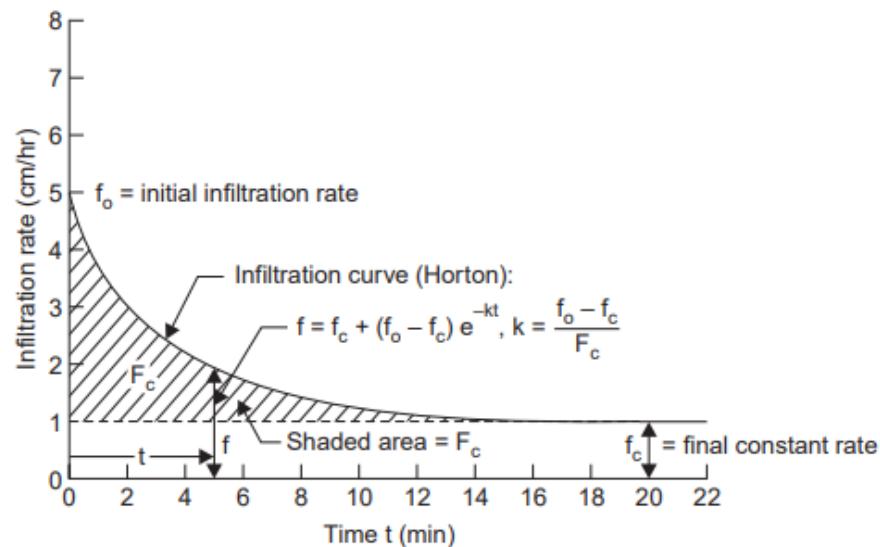


Figura 17. Representación del modelo de Horton. Fuente: Ruiz y Martínez (2003).

Se puede observar que la tasa de infiltración decrece exponencialmente a una constante k , que al multiplicar por un tiempo dado, se obtiene la tasa de infiltración para dicho tiempo. El decaimiento de la tasa de infiltración para $t = 0$ es igual a f_0 y cuando se alcanza la tasa constante de infiltración, ésta se representa por f_c .

El área delimitada por el modelo de Horton (ecuación 6), el eje de las ordenadas y f_c (Figura 17), representa la lámina de agua infiltrada durante el intervalo de tiempo considerado. Esta área está representada por F_c , la cual se calcula por integración de la ecuación 6, pero se requiere conocer los valores de k y f_0 . Otra forma de calcular F_c es con el método de los rectángulos, tal como se hizo en este trabajo.

El cálculo de k y f_0 se realizó con un método que actualmente está en desarrollo por Muñoz–Nava (comunicación personal). Este método consiste en calcular el valor de k , mediante el promedio de las k_i de puntos de medición adyacentes como se muestra en la siguiente gráfica:

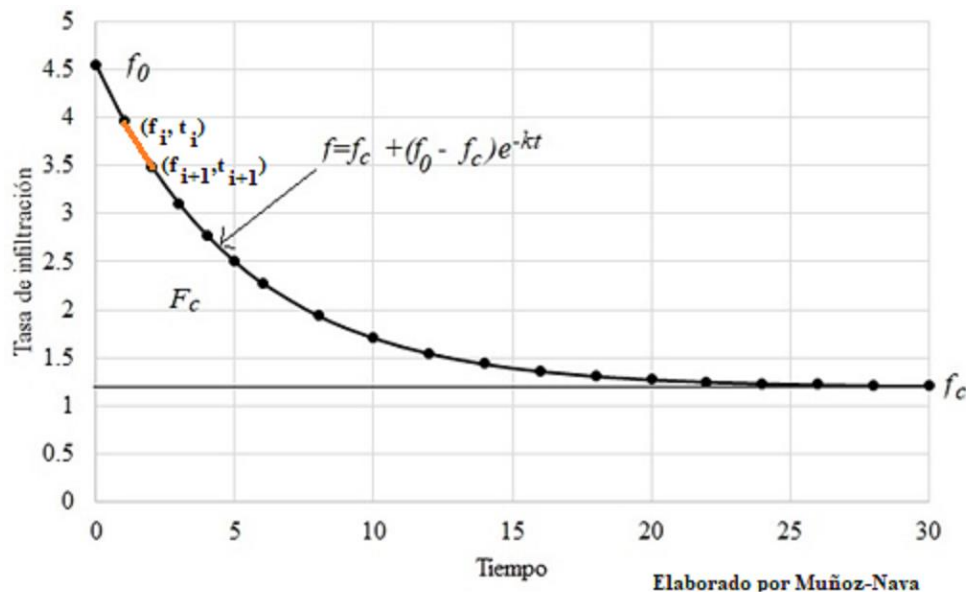


Figura 18. Modelo de Horton. Fuente: Muñoz-Nava, comunicación personal.

Para i e $i + 1$ se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$f_i = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k_i t_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$f_{i+1} = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k_i t_{i+1}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtiene el valor de k_i para un segmento de la curva, por ejemplo el marcado en rojo en la gráfica. Así sucesivamente se obtiene las demás k_i para los pares de datos adyacentes. La suposición que se hace es que el promedio de las k_i es igual al valor de k . Una vez conociendo el valor de k se calcula el valor de f_0 con la ecuación 7.

Con los valores de las constantes del modelo de Horton se calcularon las tasas de infiltración para el intervalo de tiempo de medición. Se graficaron las tasas de infiltración medidas con el doble anillo *versus* los calculados con el modelo de Horton y se obtuvo el coeficiente de correlación (r), como indicador para cuantificar la descripción de los datos obtenidos en campo por el modelo de Horton. Un valor de coeficiente de correlación igual a uno, indicaría que el modelo describe perfectamente los datos obtenidos en campo, por otro lado, si el valor del coeficiente de correlación es cero, sería un indicio de que el modelo no describe los datos obtenidos en campo.

2.4 Medición de la textura de suelo

Para la determinación de la textura se utilizó el método del hidrómetro de Bouyoucos que indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Se pesaron 100 g de suelo y agregaron a un vaso metálico, se agregó agua desmineralizada hasta unos 5 cm por debajo del borde. Después se colocaron 5 mL del agente dispersante (solución de hexametafosfato y carbonato de sodio). El vaso se colocó en una batidora marca Osterizer por 6 min se agitó. Al finalizar el tiempo se vertió el contenido a una probeta de 1000 mL, con el hidrómetro dentro se aforó a 1000 mL, posteriormente con una probeta se agregaron 205 mL más. Con un agitador manual se removió la solución de manera verticalmente unas 10 veces a lo largo de todo el cilindro. Tan pronto se terminó la

agitación se realizó la lectura a 40 s y se midió la temperatura de la solución y después a las 2 h.

Para realizar los cálculos del porcentaje de partículas se corrigieron las lecturas del hidrómetro con base a la temperatura, de acuerdo con la tabla de corrección que indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 y posteriormente se aplicaron las siguientes ecuaciones.

$$\% \text{ arena total} = \frac{(\text{Lectura a los 40 s}) 100}{\text{peso de la muestra}}$$

$$\% \text{ arcilla total} = \frac{(\text{lectura a las 2 h}) 100}{\text{peso de la muestra}}$$

$$\% \text{ limo} = \frac{(\text{lectura a los 40 seg} - \text{lectura a las 2 h}) 100}{\text{peso de la muestra}}$$

Con los porcentajes de limo, arena y arcilla se determina la clase textural del suelo, para ello se utilizó el triángulo de clases texturales (figura 20).



Figura 19. Determinación de textura de suelo.

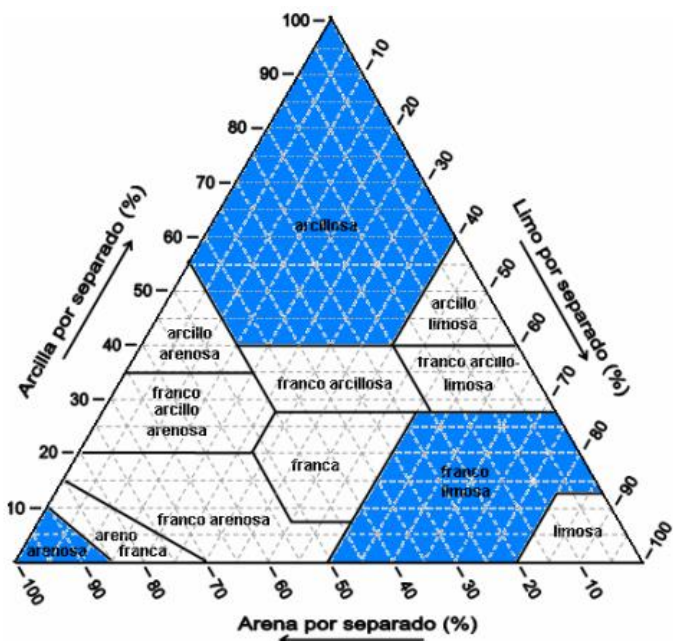


Figura 20. Triángulo de clases texturales de los suelos (Juárez, 2003).

2.5 Medición de la infiltración con lisímetro

Para cuantificar la cantidad de agua infiltrada por evento pluvial, se utilizó un lisímetro de drenaje libre en condiciones ambientales. Este lisímetro se construyó con un recipiente de polietileno de alta densidad de 28.1 cm de diámetro y 35 cm de altura (Muñoz *et al*, 2018). Se colocó una capa de suelo de 18 cm y una capa de arena de 5 cm de espesor en el interior del recipiente con un peso volumétrico de 0.99 g/cm^3 (Figura 21). La capa de suelo se tomó de un terreno de la comunidad de Santo Tomás La Concordia.

El método consiste en tomar lectura del volumen de agua de la infiltración después de cada evento pluvial, se tomaron lecturas de junio 2021 a junio 2022.



Figura 21. Lisímetro de polietileno.

2.6 Medición de la precipitación

Para medir la precipitación se instaló un pluviómetro, verificando que no lo obstruyera ningún objeto, se tomó datos después de cada evento pluvial, durante un año de enero a diciembre 2021 (Figura 22).

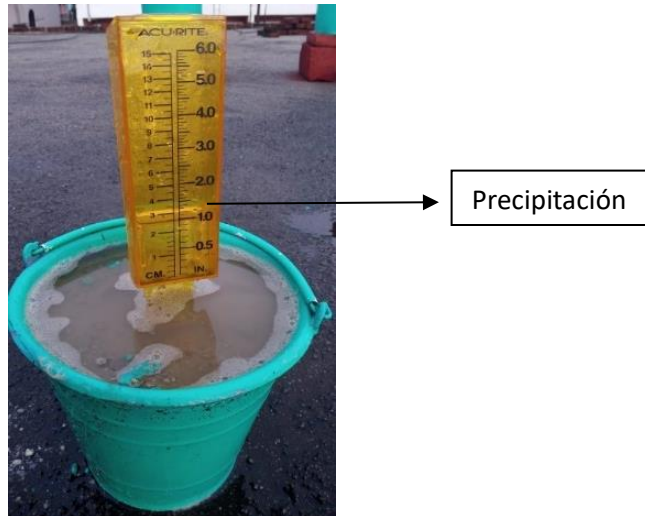


Figura 22. Pluviómetro.

2.7 Medición de la temperatura y humedad ambiental y del suelo

Se instaló equipo Hubb para medir la temperatura y humedad del ambiente, así como la del suelo durante un periodo de un año a partir de enero de 2021 a enero 2022 (Figura 23).



Figura 23. Medición de temperatura y humedad con equipo Hubb.

2.8 Relación entre la infiltración y parámetros ambientales

Como una forma de integrar o sintetizar la información, se realizó una matriz de correlaciones de las variables estudiadas de cada sitio de muestreo, para detectar

posibles relaciones plausibles entre las variables. En la matriz se consideraron las constantes del modelo de Horton, variables del suelo (temperatura y humedad) y variables del ambiente (temperatura y humedad relativa).

III RESULTADOS

3.1 Aplicación de encuestas

Los resultados de la aplicación de encuestas, a 21 propietarios de los terrenos ejidales donde se realizaron las mediciones de infiltración, se encuentran en la tabla 2 para el sitio de Santo Tomás La Concordia y en la tabla 3 para el sitio de San Rafael.

En la columna tres se encuentra el historial de los cultivos, los cuales son: maíz, alfalfa, haba, avena, forraje, ebo, tomate, trigo, frijol, cebada, calabaza, amaranto y ayocote. Los cultivos que predominan son: maíz y alfalfa, y en menor recurrencia haba, avena, forraje y ebo.

En la columna cuatro se observa el tipo de labranza que los propietarios realizan, las cuales son: abonar, arar, barbechar, melgar, paletear, rastrear, sembrar, corte, aumentar nivel de suelo y surcar.

Todos los propietarios de estos terrenos ejidales mencionaron que utilizan tractor, excepto un agricultor que utiliza yunta.

La encuesta evidenció que los propietarios riegan con la técnica conocida como “rodado”. Con sistemas de bombeo tradicionales extraen agua del río Atoyac hacia sus parcelas. La lluvia de temporal complementa los requerimientos de agua para sus cultivos.

Tabla 2. Aplicación de encuestas a los propietarios de los terrenos ejidales de Santo Tomás La Concordia

Punto	Tipos de cultivos	Labranza	Maquinaria agrícola	Tipo de riego	Fuente de agua para el riego
1	Tomate	Barbecho	-----	Rodado	Río
2	Forraje	Solo corte	-----	Rodado	Río
3	Ebo	Barbecho	Tractor	Rodado	Río
	Tomate	Rastra			
	Haba	Arar			
	Amaranto	Surcar			
	Maíz	Sembrar			
	Alfalfa				

4	Calabaza Ebo Tomate Haba Amaranto Maíz	Barbecho Rastra Arar Surcar Sembrar	Tractor	Rodado	Río
5	Forraje	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Rodado	Río
6	Forraje Maíz Frijol Tomate Avena Alfalfa Cebada Trigo Calabaza	Rastra Arar Surcar Sembrar	Tractor y manual (yunta)	Rodado	Río Pozo
7	Maíz Avena Cebada	Arar Rastrear Surcar	Tractor	Temporal	-----
8	Forraje	Subir nivel de suelo Abonar Arar Rastrear	Tractor	Rodado	Pozo
9	Maíz Alfalfa	Arar Rastrear Arar Surcar	Tractor	Rodado	Río
10	Maíz	Arar Rastrear Arar Surcar	Tractor	Temporal	-----
11	Maíz Frijol Trigo Avena Ebo Haba Ayocote	Arar Rastrear Arar Surcar Rastra Paleta	Tractor	Rodado	Pozo Rio
12	Maíz Frijol Trigo Ebo Haba	Arar Rastrear Arar Surcar Paleta	Tractor	Rodado	Pozo Rio

Tabla 3. Aplicación de encuestas a los propietarios de los terrenos ejidales de San Rafael.

Punto	Tipo de cultivos	Labranza	Maquinaria agrícola	Tipo de riego	Fuente de agua para el riego
-------	------------------	----------	---------------------	---------------	------------------------------

1	Alfalfa	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Temporal	-----
2	Alfalfa Maíz	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Temporal	-----
3	Ebo Avena Haba	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Temporal	-----
4	Avena Alfalfa Maíz	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Rodado	Pozo
5	Avena Alfalfa	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Temporal	-----
6	Maíz Alfalfa	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Rodado	Pozo
7	Haba	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Temporal	-----
8	Maíz Alfalfa Haba	Barbecho Rastra Siembra Melgado	Tractor	Rodado	Pozo
9	Alfalfa	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Temporal	-----
10	Alfalfa Maíz Forraje	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Rodado	Pozo
11	Alfalfa Maíz	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Rodado	Rio
12	Alfalfa Maíz	Barbecho Rastra Siembra	Tractor	Rodado	Rio

3.2 Medición de la infiltración *in situ* con doble anillo

Se utilizaron dos anillos de Policloruro de Vinilo (PVC) de 500 mm (20 pulgadas) de altura. El anillo interno fue de 154 mm (6 pulgadas) de diámetro, con un espesor de pared o calibre de 7.1 mm (0.280 pulgadas). El anillo externo fue de 304.8 mm (12 pulgadas) de diámetro, con un espesor de pared o calibre de 10.3 mm (0.406 pulgadas). Ambos anillos con borde biselado para dar filo, facilitar el corte y la penetración en el suelo.

3.2.1 Puntos de medición

Las características visuales de los puntos de medición de los sitios de Santo Tomás La Concordia se encuentran en la tabla 4 y de los sitios de San Rafael, en la tabla 5. En esta

tabla se puede observar los elementos visuales que se encontraron, cuando se realizaron las mediciones de infiltración como: abono orgánico o estiércol, fertilizante químico como urea, hojarasca, agua, entre otras. 16 de las 24 parcelas o terrenos son planos, cinco ondulados y tres inclinados, con presencia de cultivos de alfalfa, maíz y forraje.

Tabla 4. Puntos de medición del sitio Santo Tomás La Concordia

Punto	Componente físico	Tipo de terreno	Resistencia	Color de suelo	Obstáculos para medir	Cultivo
1	Barbecho	Plano	Blando	Gris claro	Ninguno	Barbecho
2	Rastrojos de forraje	Plano	Duro	Negro	Ninguno	Forraje
3	Hojarasca Microporos Estructura granular	Plano	Semiduro	Negro	Ninguno	Siembra de maíz
4	Hojarasca Macroporos	Ondulado	Blando	Gris claro	Zanja	Siembra de maíz
5	Abono orgánico Agua	Plano	Semiduro	Negro	Ninguno	Alfalfa
6	Hojarasca Abono orgánico Microporos Estructura laminar	Plano	Duro	Negro	Arboles	Forraje
7	Fertilizante Urea	Plano	Blando	Gris claro	Ninguno	Maíz
8	Raíces de haba Estructura granular	Plano	Semiduro	Café oscuro	Ninguno	Maíz
9	Raíces de haba, alfalfa. Estructura granular	Ondulado	Duro	Negro	Ninguno	Maíz Alfalfa
10	Hojarasca Microporos Estructura granular	Plano	Semiduro	Gris claro	Ninguno	Maíz
11	Abono orgánico Macroporos	Ondulado	Semiduro	Negro metálico	Acopio de abono orgánico	Alfalfa Forraje
12	Microporos Estructura laminar	Plano	Duro	Negro claro	Ninguno	Maíz

Tabla 5. Puntos de medición del sitio San Rafael

Punto	Componente físico	Tipo de terreno	Resistencia	Color de suelo	Obstáculos para medir	Cultivo
1	Raíces de la alfalfa Microporos Estructura granular	Plano	Semi duro	Gris oscuro	Ninguno	Alfalfa

2	Raíces de alfalfa	Plano	Semi duro	Gris claro	Bordo		Alfalfa
3	Raíces de haba	Plano	Blando	Pardo amarillento	Cultivo de haba		Haba
4	Raíces de alfalfa	Plano	Semi duro	Gris claro	Ninguno		Alfalfa
5	Raíces de alfalfa Microporos Estructura granular	Inclinado	Duro	Gris claro	Inclinación		Alfalfa
6	Raíces de forraje	Plano	Semiduro	Gris claro	Ninguno		Forraje
7	Abono orgánico Macroporos Estructura granular	Plano	Duro	Gris claro	Arboles		Ninguno
8	Zacate de maíz Hojarasca Raíces de arboles	Inclinado	Blando	Gris oscuro	Cosecha de zacate de maíz		Zacate para forraje
9	Rastrojo Estructura granular Macroporos	Plano	Duro		Árbol		Rastrojo
10	Microporos Estructura laminar Raíces de alfalfa	Inclinado	Duro	Marrón	Ninguno		Alfalfa
11	Abono orgánico Microporo	Ondulado	Duro	Café claro	Residuos solidos Tocón		Alfalfa
12	Rastrojo de alfalfa Macroporos	Ondulado	Duro	Café claro	Ninguno		Alfalfa

3.2.2 Medición de la infiltración

Cuando se realizaron las mediciones de infiltración, se observó que existían algunos obstáculos (Figura 24) como: zanjas, bordos, árboles y cultivos, por lo cual se hincaron los anillos a un lado del punto donde indicaba el mapa. Se observó que para hincar los anillos dependía de las condiciones de las parcelas, a mayor compactación, presencia de cultivo y rastrojo (Figura 25) era mayor la dificultad para realizar el proceso de hincar los anillos.

Para la realización de la obtención de lecturas de infiltración se observó que el tiempo que transcurrió hasta alcanzar las condiciones de saturación en el suelo depende de la humedad previa, la textura y estructura del suelo, el espesor del horizonte, a mayor humedad del suelo menor es el tiempo de saturación (Figura 26). El intervalo de tiempo de medición de todos los puntos de medición fue de 0.5 a 6 horas.



Figura 24. Parcela con obstáculo de árboles para la medición de infiltración. **Figura 25.** Proceso de hincar los anillos para la medición de infiltración. **Figura 26.** Obtención de las lecturas de infiltración.

3.2.3 Análisis de los datos de las mediciones de infiltración

Los tiempos de medición, es decir el tiempo cuando se alcanzó el valor de f_c , las constantes del modelo de Horton y los coeficientes de correlación, se encuentran en la tabla 6 para Santo Tomás La Concordia y en la tabla 7 para San Rafael .

Tabla 6. Promedios de los parámetros del modelo exponencial y estimaciones de infiltración Horton, en diferentes sitios de La Concordia, Nativitas.

Sitio	$t(f_c)$ (h)	Ti (cm/h)	f_0 (cm)	f_c (cm/h)	k (1/h)	F_c (cm)	r	F (cm)
1	3.33	18.3	33.4	14.7	10.1	3.1	0.82	18.5
2	2.83	18.7	54.6	12.6	15.8	2.6	0.93	19.0
3	5.00	7.0	12.9	1.4	0.7	16.6	0.81	5.8
4	3.00	13.4	27.0	6.0	2.5	8.2	0.89	12.6
5	3.67	12.4	33.5	1.8	2.2	14.6	0.64	10.6
6	3.50	10.8	30.8	3.8	2.4	11.4	0.87	11.2
7	4.33	5.8	30.8	1.4	3.6	8.1	0.87	8.1
8	2.83	9.5	48.0	3.6	5.2	8.5	0.71	14.4
9	2.33	13.1	42.3	6.0	5.6	6.5	0.83	15.9
10	3.00	16.4	68.0	5.0	6.6	9.6	0.78	21.2
11	0.33	82.2	100.2	52.0	13.6	3.5	0.77	74.7
12	5.83	16.3	22.3	2.4	0.9	22.6	0.60	13.7
Promedio	3.33	18.7	42.0	9.2	5.8	9.6	0.79	18.8

$t(f_c)$ = tiempo cuando se alcanzó f_c . Ti=Tasa de infiltración. f_0 =Tasa de infiltración inicial. f_c =Tasa de infiltración constante o de equilibrio. k =Constante de decaimiento de la infiltración. F_c = Área bajo la curva, delimitada por f_c , el eje vertical y el modelo de Horton. r = Coeficiente de correlación. F=Agua acumulada.

Tabla 7. Promedios de los parámetros del modelo exponencial y estimaciones de infiltración Horton, en diferentes sitios de San Rafael.

Sitio	$t(f_c)$ (h)	Ti (cm/h)	f_0 (cm)	f_c (cm/h)	k (1/h)	F_c (cm)	r	F (cm)
-------	-----------------	-----------	------------	-----------------	-----------	---------------	-----	--------

1	3.50	16.1	56.6	11.2	6.1	7.4	0.88	17.4
2	2.67	16.0	134.0	6.0	26.3	4.9	0.89	21.2
3	2.33	8.3	61.6	3.0	10.8	5.4	0.68	15.3
4	4.00	22.2	68.6	5.9	1.3	47.6	0.62	32.2
5	3.50	11.8	18.3	0.0	0.6	28.5	0.81	9.3
6	3.00	13.1	17.0	12.0	4.4	1.1	0.73	13.3
7	2.33	5.3	14.8	1.8	4.9	2.7	0.85	5.5
8	2.00	21.3	75.8	6.2	5.8	12.1	0.81	27.0
9	3.67	11.7	31.5	7.4	4.0	6.1	0.83	14.8
10	2.50	10.1	23.7	3.6	4.5	4.5	0.86	9.5
11	4.50	9.1	19.4	3.5	3.0	5.2	0.82	8.9
12	3.50	16.1	29.1	11.2	5.4	3.3	0.83	16.2
Promedio	3.13	13.43	45.9	5.98	6.4	10.7	0.80	15.9

$t(f_c)$ = tiempo cuando se alcanzó f_c . T_i =Tasa de infiltración. f_0 =Tasa de infiltración inicial. f_c =Tasa de infiltración constante o de equilibrio. k =Constante de decaimiento de la infiltración. F_c = Área bajo la curva, delimitada por f_c , el eje vertical y el modelo de Horton. r = Coeficiente de correlación. F =Agua acumulada.

Las Tablas 6 y 7 muestran que las constantes de Horton tuvieron valores disímboles, es decir que mientras los valores promedio de los doce puntos de medición de f_0 , k y F_c fueron menores en La Concordia con respecto a ; el valor de f_c , fue mayor. En ambos sitios los tiempos de medición tuvieron un promedio de alrededor de tres horas, solo una diferencia de 20 minutos mayor en La Concordia, pero en este sitio se registró el menor tiempo (0.33 horas) y el mayor (5.83 horas). Las gráficas de cada una de las mediciones se encuentran en las Figuras 27 a 38, para el sitio Santo Tomás La Concordia y en las Figuras 39 a 50 para el sitio San Rafael. Las gráficas presentan el eje del tiempo con valor máximo de 6 horas, debido a que el tiempo máximo de medición de 5.83 horas se registró en el punto 12 de La Concordia. Respecto al eje de la tasa de infiltración, las gráficas presentan una escala hasta el valor de 180 cm/h, porque este fue el valor máximo de la tasa de infiltración calculado en el punto de medición 11 en La Concordia, al registrarse el mayor descenso del nivel de la columna de agua en el cilindro interior. Estas escalas de los ejes, hacen que, en los puntos de medición con valores menores de tiempos y tasas de infiltración, los puntos de los datos medidos y los obtenidos con el modelo de Horton se aglomeren en la parte inferior izquierda de la gráfica. En relación al coeficiente de correlación, en ambos sitios de medición, el modelo de Horton describió de manera aceptable las tasas de infiltración, los valores promedio de ambos sitios de medición rondaron el valor de 0.8, el menor valor de r fue igual a 0.6 y el mayor de 0.9, ambos calculados para puntos de medición en La Concordia.

La Concordia, Nativitas

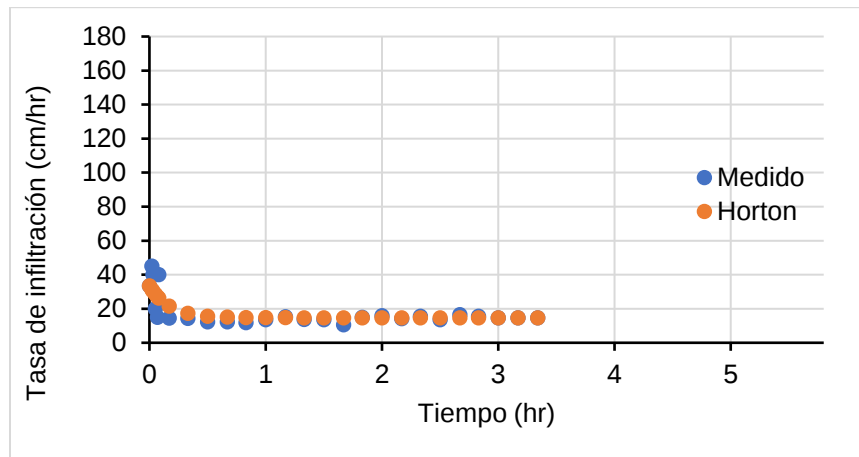


Figura 27. Tasa de infiltración del punto 1.

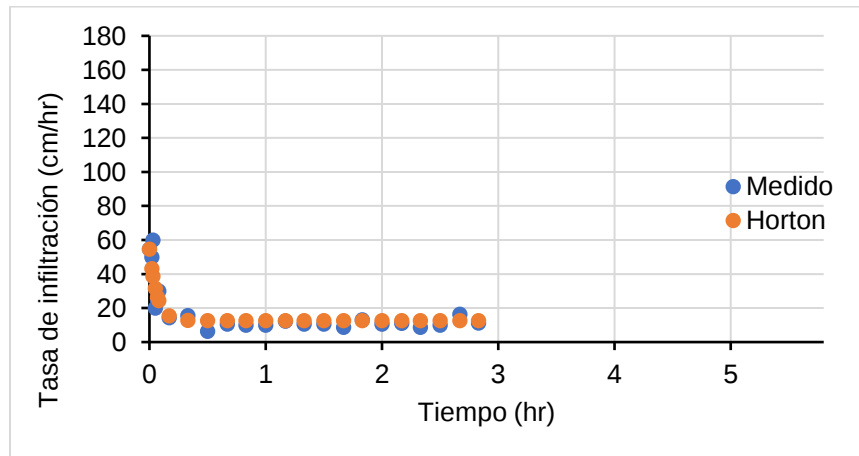


Figura 28. Tasa de infiltración punto 2.

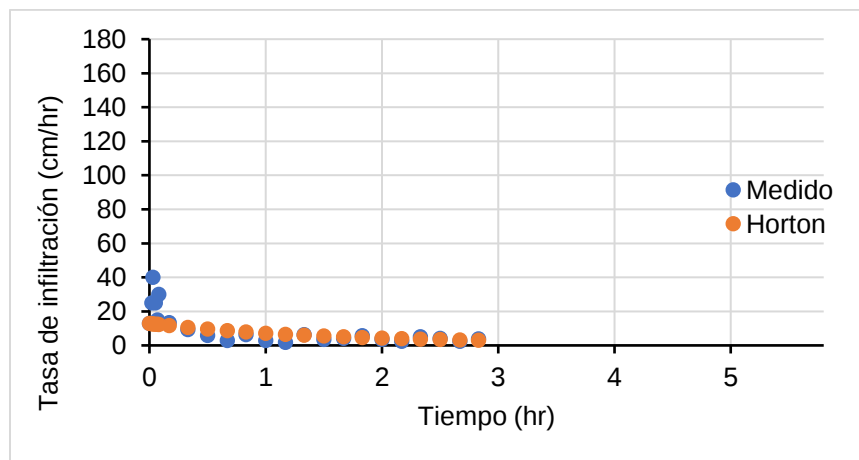


Figura 29. Tasa de infiltración del punto 3.

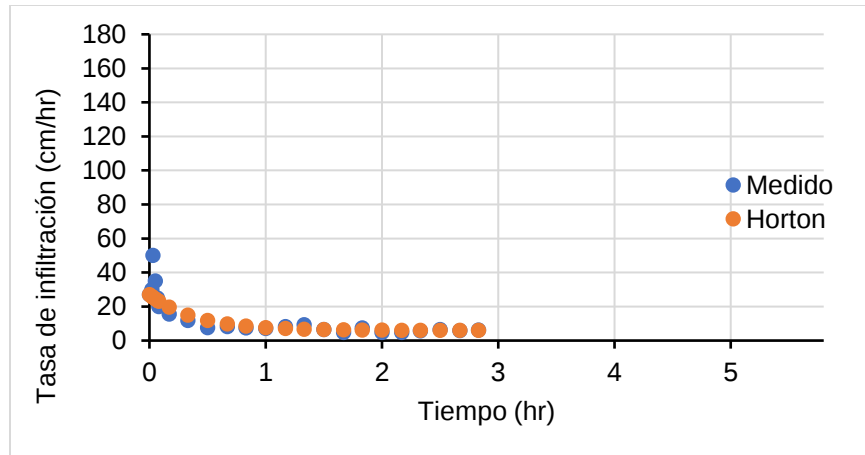


Figura 30. Tasa de infiltración del punto 4.

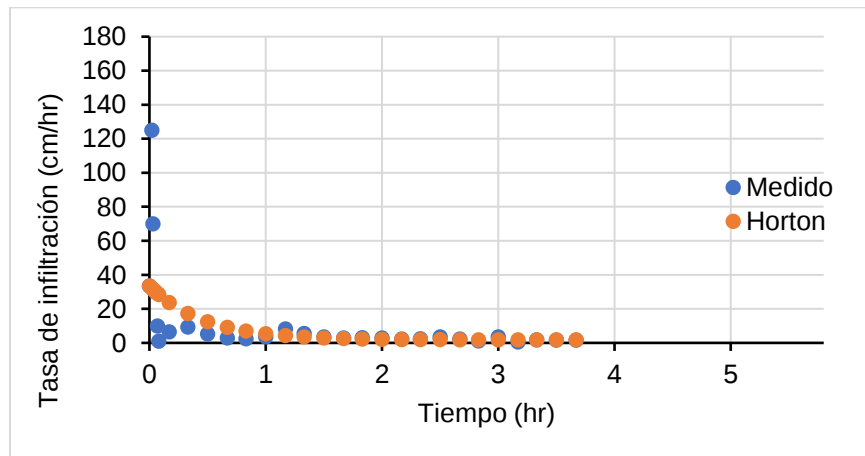


Figura 31. Tasa de infiltración del punto 5.

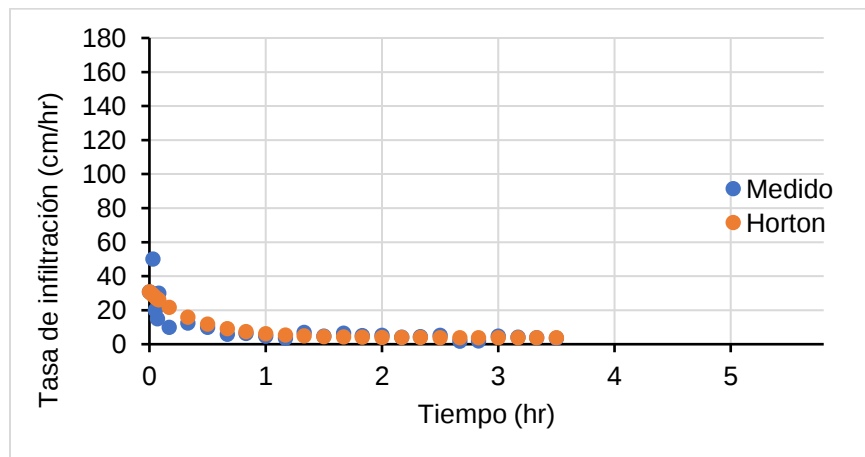


Figura 32. Tasa de infiltración del punto 6.

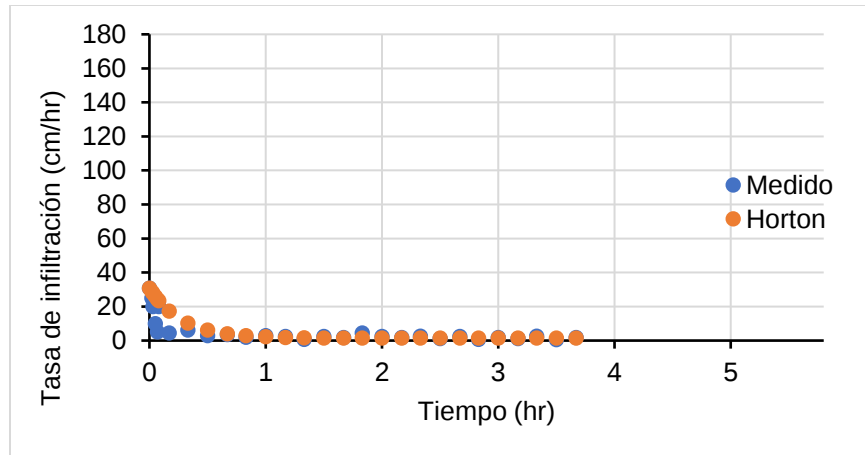


Figura 33. Tasa de infiltración del punto 7.

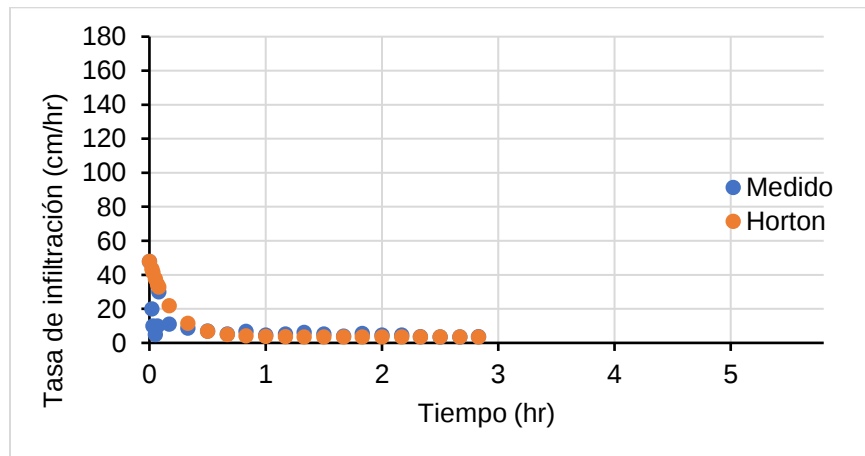


Figura 34. Tasa de infiltración del punto 8.

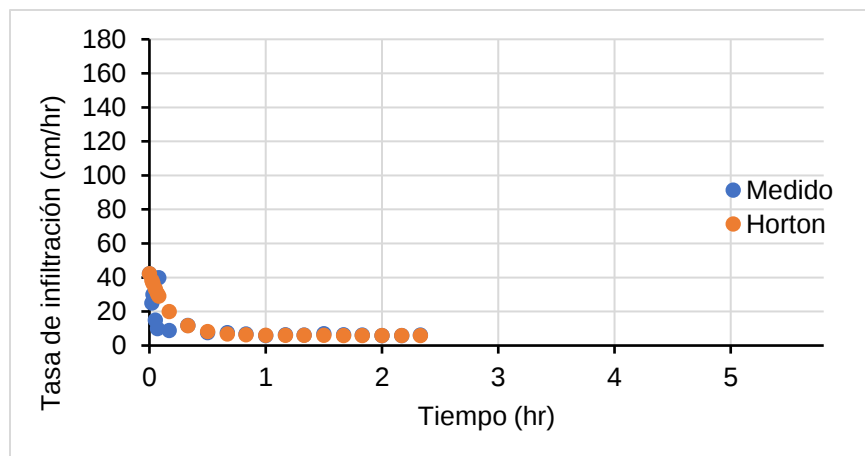


Figura 35. Tasa de infiltración del punto 9.

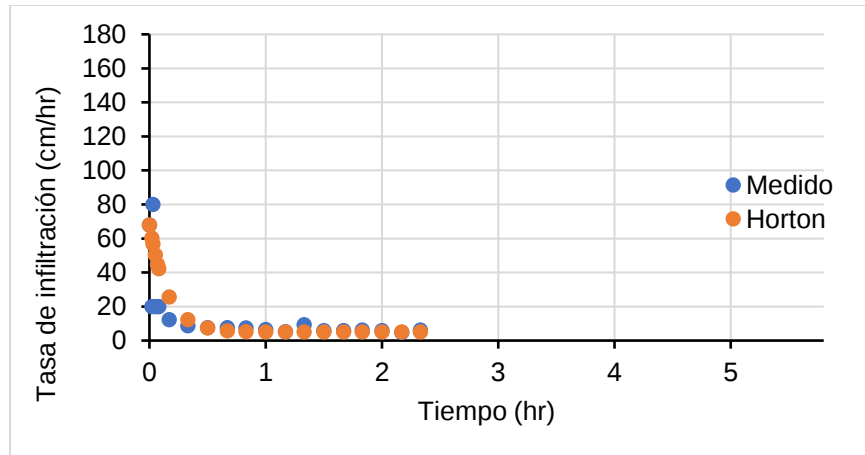


Figura 36. Tasa de infiltración del punto 10.

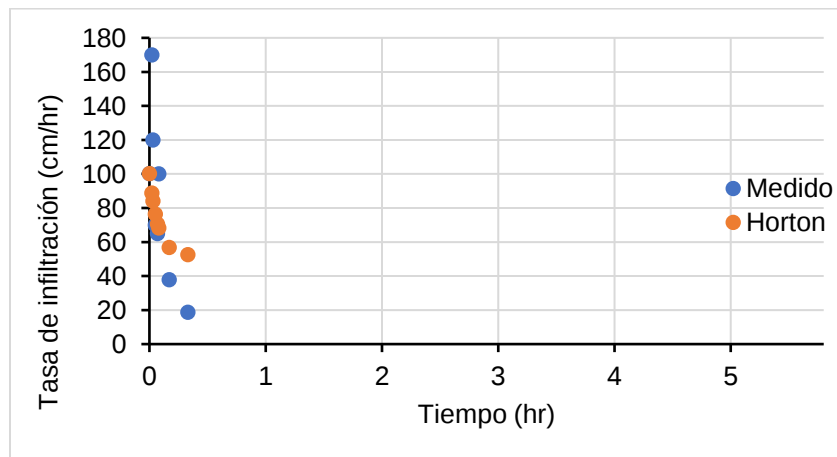


Figura 37. Tasa de infiltración del punto 11.

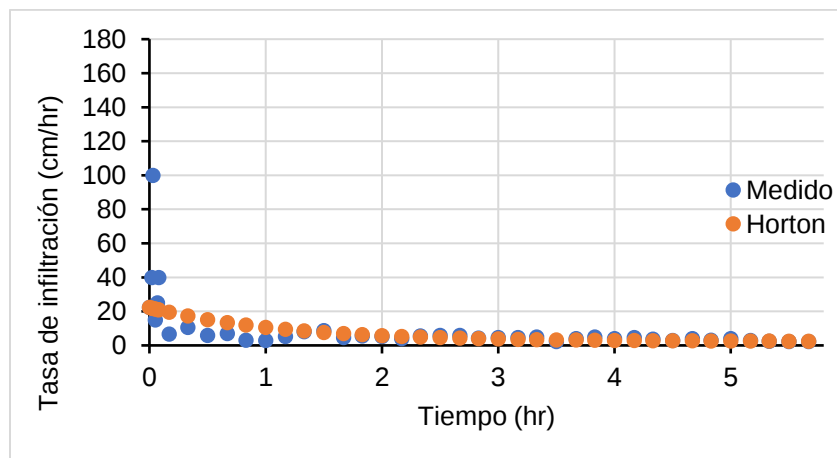


Figura 38. Tasa de infiltración del punto 12.

San Rafael

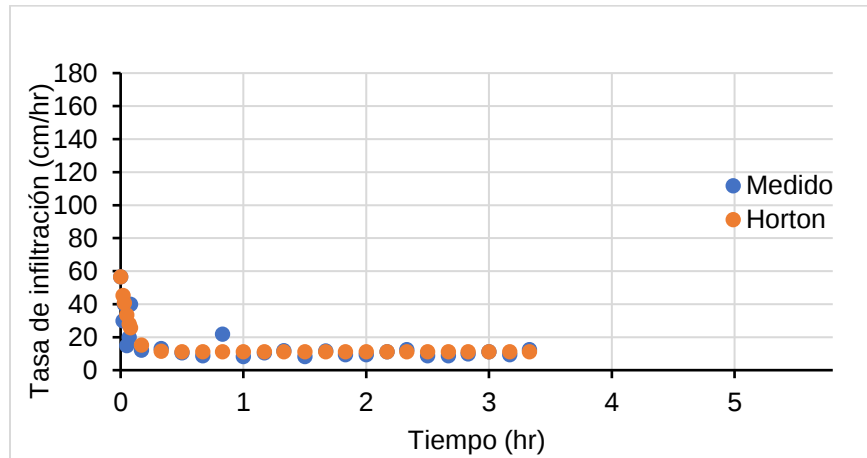


Figura 39. Tasa de infiltración del punto 1.

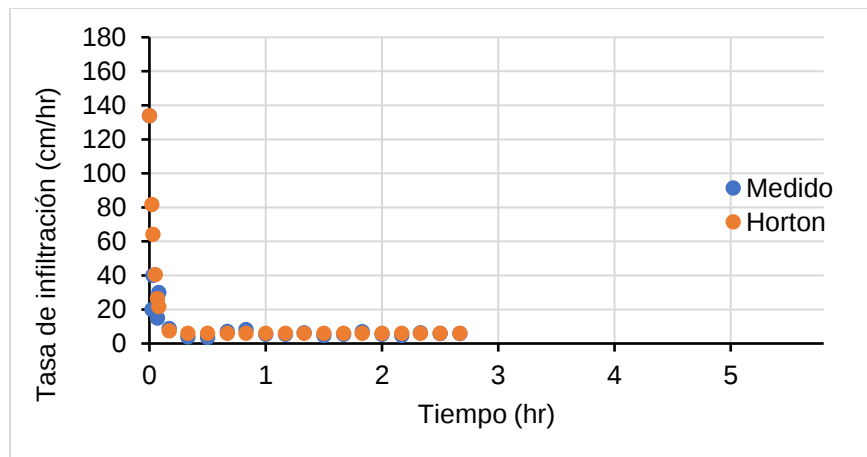


Figura 40. Tasa de infiltración del punto 2.

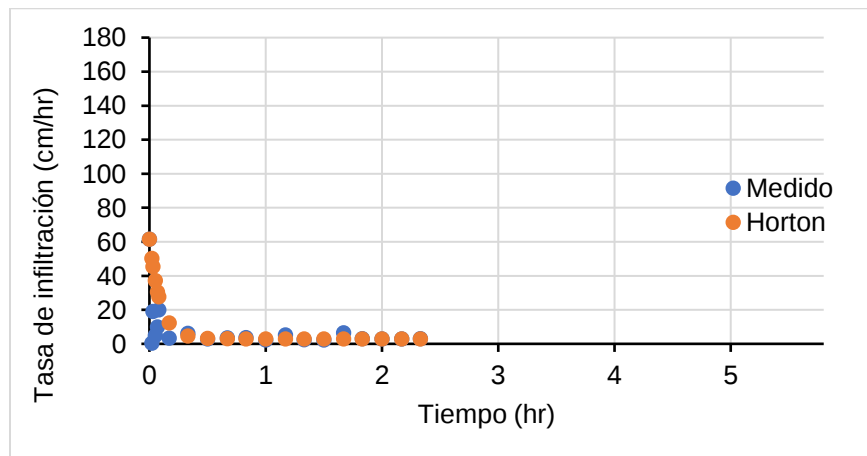


Figura 41. Tasa de infiltración del punto 3.

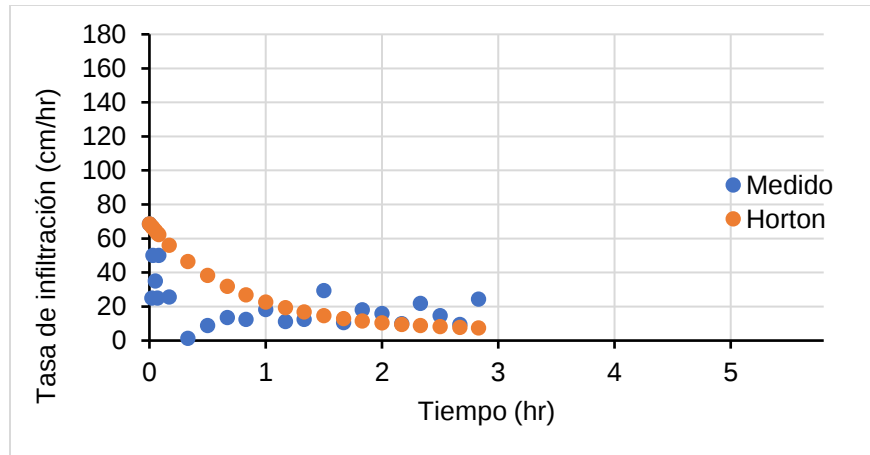


Figura 42. Tasa de infiltración del punto 4.

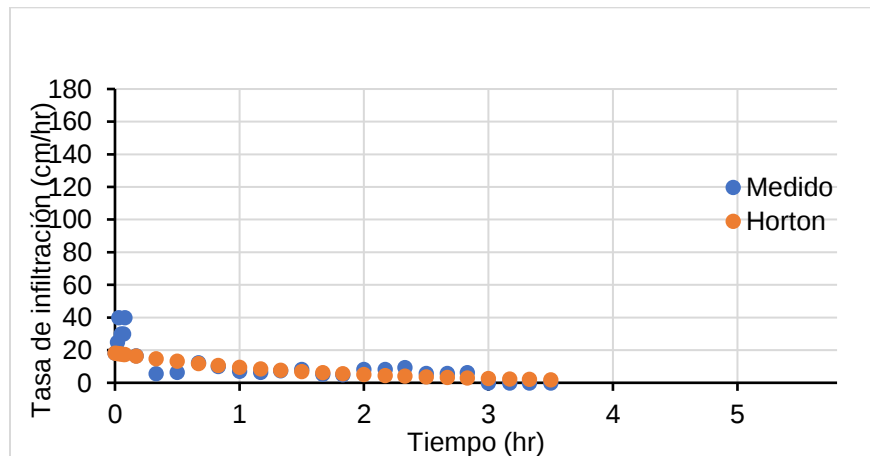


Figura 43. Tasa de infiltración del punto 5.

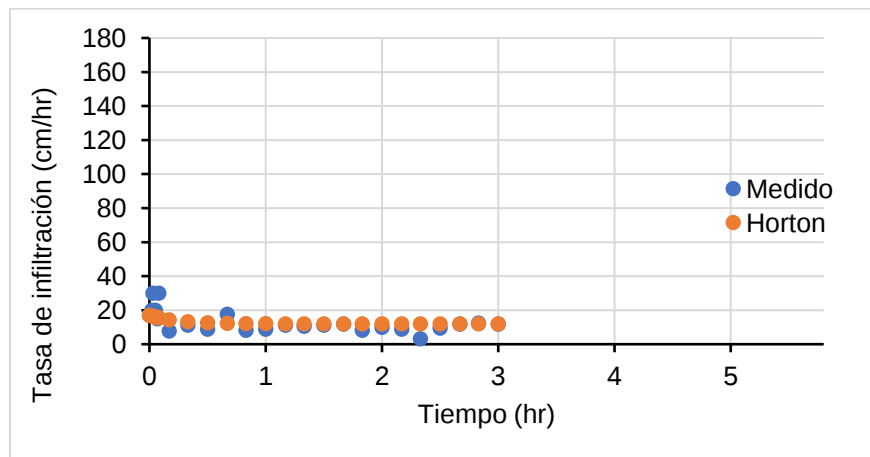


Figura 44. Tasa de infiltración del punto 6.

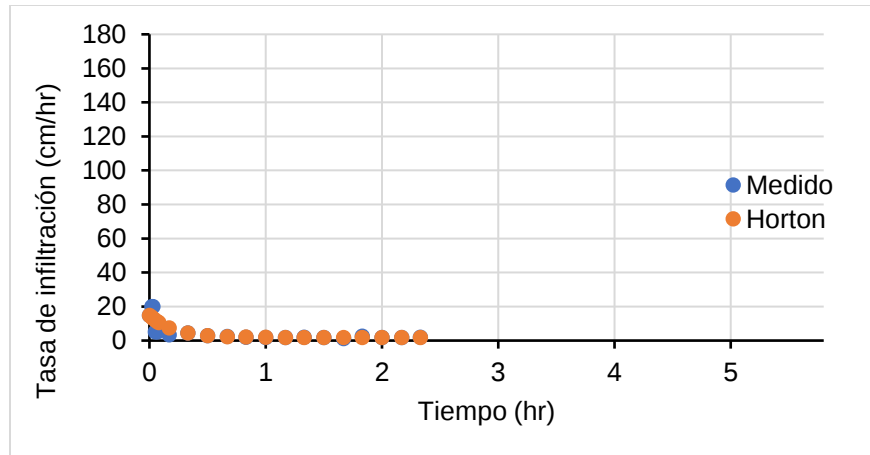


Figura 45. Tasa de infiltración del punto 7.

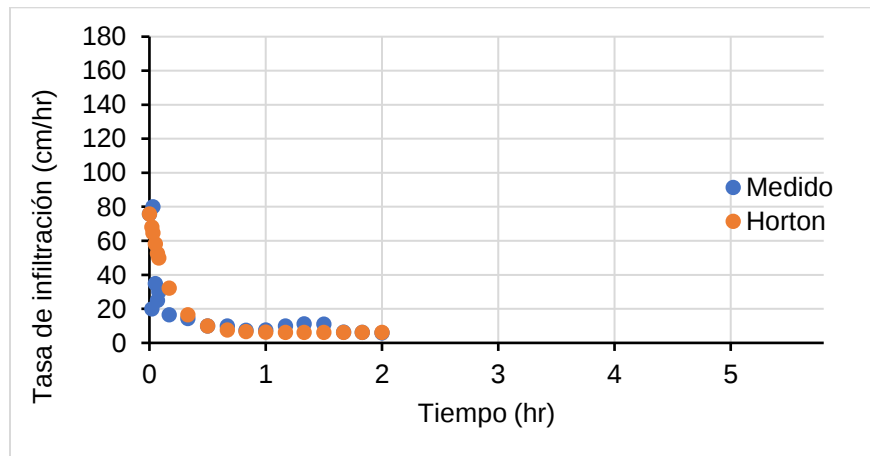


Figura 46. Tasa de infiltración del punto 8.

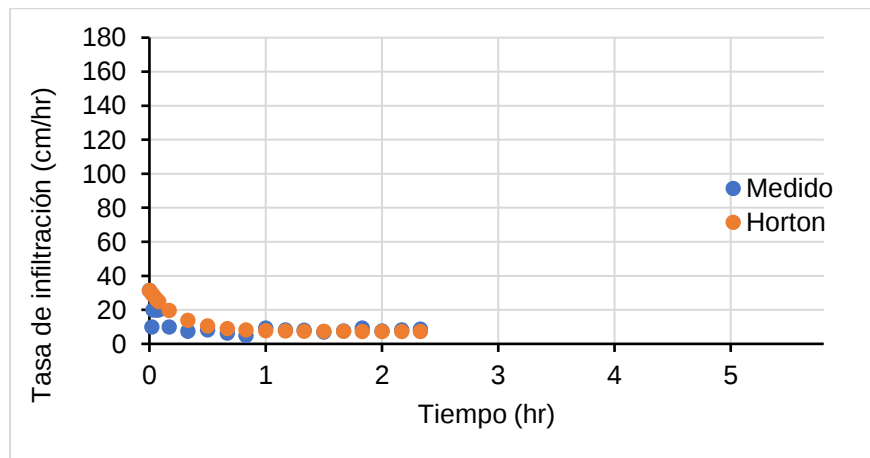


Figura 47. Tasa de infiltración del punto 9.

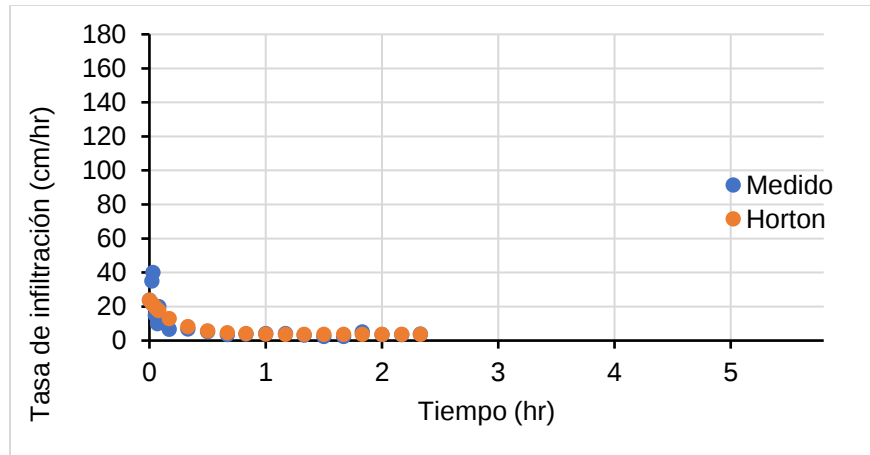


Figura 48. Tasa de infiltración del punto 10.

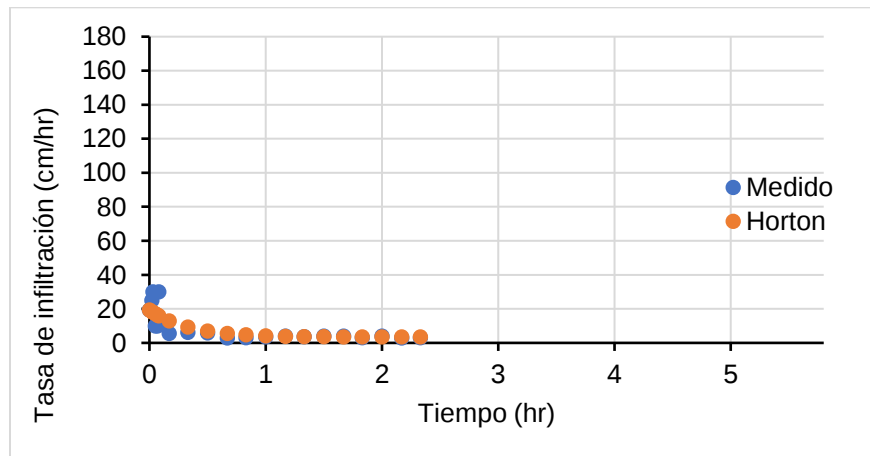


Figura 49. Tasa de infiltración del sitio punto 11.

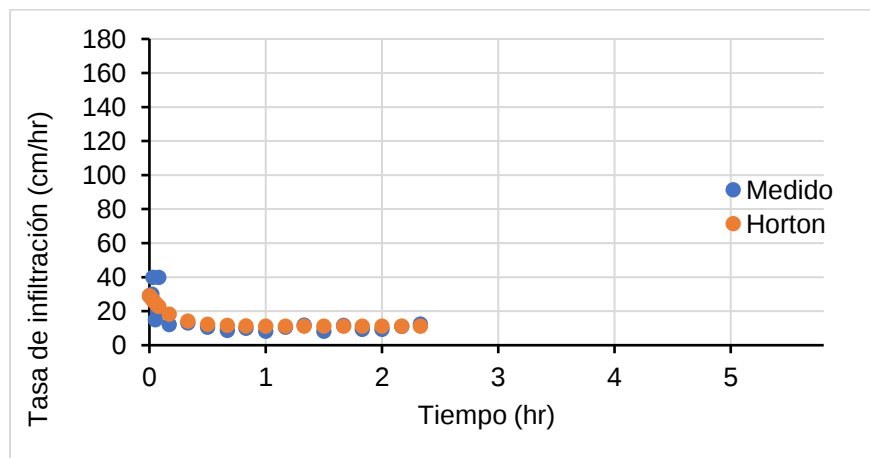


Figura 50. Tasa de infiltración del punto 12.

3.3 Medición de la textura de suelo

En los sitios de San Rafael en nueve de ellos existe un predominio de la fracción arena >50%, los sitios 2, 3 y 5 presentaron un porcentaje mayor de la partícula limo (60.46, 67.16 y 69.16, respectivamente); mientras que, en La Concordia todos los sitios tuvieron la mayor cantidad de arena, la cual osciló entre el 58.74 al 90.74% (Tabla 8).

Tabla 8. Valores del porcentaje de partículas de suelo en los diferentes sitios.

Punto	Santo Tomás La Concordia				San Rafael			
	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
1	90.74	8.46	0.80	Arenosa	78.92	18.10	2.98	Areno franca
2	73.92	20.82	5.26	Areno franca	31.24	60.46	8.30	Franco limosa
3	76.74	19.28	3.98	Areno franca	26.88	67.16	5.96	Franco limosa
4	60.92	31.82	7.26	Franco arenosa	84.92	11.46	3.62	Areno franca
5	58.74	28.00	13.26	Franco arenosa	24.88	69.16	5.96	Franco limosa
6	58.74	29.28	11.98	Franco arenosa	86.92	10.46	2.62	Areno franca
7	61.74	32.28	5.98	Franco arenosa	76.92	16.46	6.62	Areno franca
8	69.92	26.82	3.26	Franco arenosa	65.92	29.28	4.80	Franco arenosa
9	67.56	26.82	5.62	Franco arenosa	73.92	21.28	4.80	Areno franca
10	63.74	31.64	4.62	Franco arenosa	72.92	19.28	7.80	Areno franca
11	80.74	14.28	4.98	Areno franca	55.74	42.46	1.80	Franco arenosa
12	66.92	31.82	1.26	Franco arenosa	81.74	11.46	6.80	Areno franca
Promedio	69.20	25.11	5.68		63.41	31.41	5.17	

3.4 Medición de la infiltración con el lisímetro

La infiltración del agua pluvial en los lisímetros ocurrió cuando el suelo alcanzó la saturación. La lámina de agua infiltrada en el periodo de medición fue de 241mm anual en el lisímetro 1 (Figura 51), esto representa el 17% de las precipitaciones pluviales ocurridas. Para el lisímetro 2 la infiltración total fue de 247.8 mm, es decir 18.12% de las lluvias (Figura 52). En el lisímetro 3 se infiltraron 230mm, lo cual representa 16% de las precipitaciones pluviales (Figura 53). Los eventos pluviales con las mayores láminas de infiltración se ocurrieron en los meses de junio a septiembre.

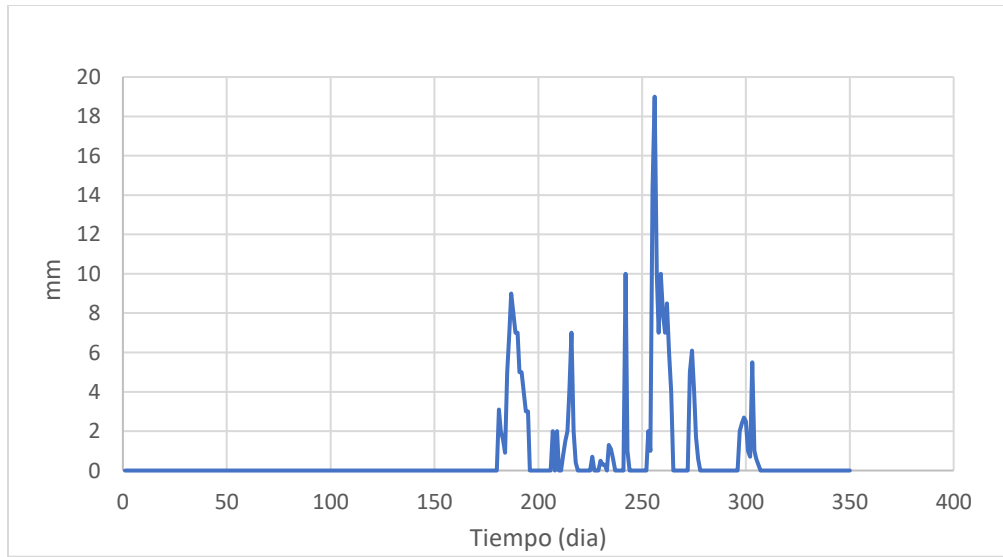


Figura 51. Infiltración con el lisímetro 1.

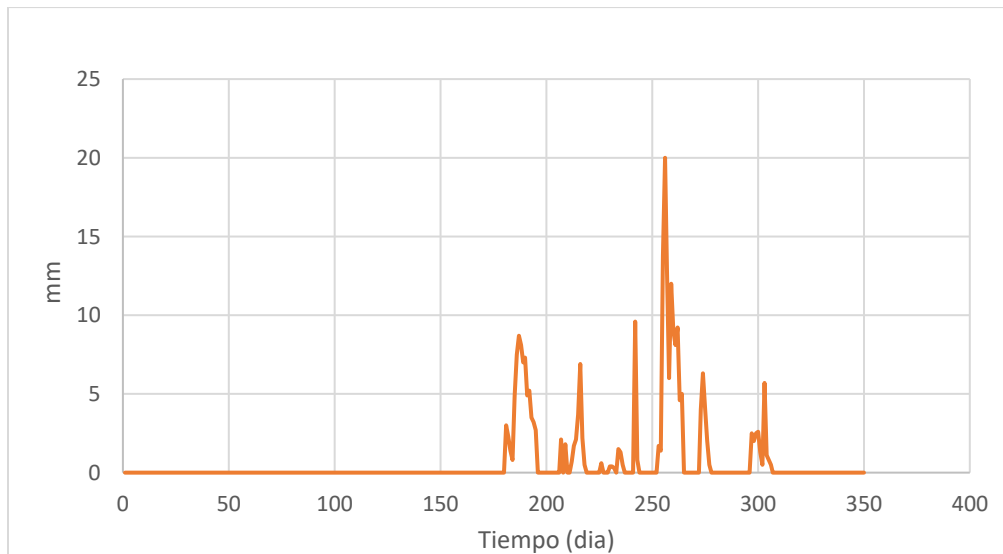


Figura 52. Infiltración con el lisímetro 2.

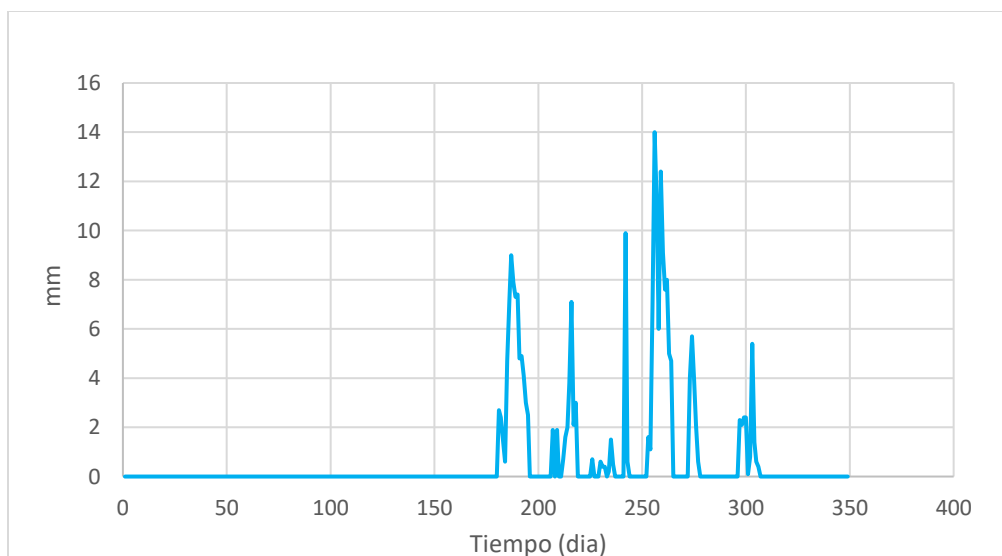


Figura 53. Infiltración con lisímetro 3.

3.5 Medición de la precipitación

En total se registraron 101 eventos pluviales. La lámina de la precipitación pluvial total del año de estudio, fue igual 1389.2 mm. La precipitación mínima fue de 0.1 mm, el cual ocurrió en 10 eventos y la máxima de 50 mm, ocurrida el 3 de agosto de 2021. En la figura 54, se muestra la distribución de los eventos pluvial en función del tiempo. La clasificación de los eventos pluviales en categorías de 5 mm se encuentra en la figura 55. Se puede observar que los eventos pluviales de 5 mm a 12 mm son los más frecuentes y, por otro lado, los eventos de mayor magnitud, mayores de 3 mm, ocurrieron con menor frecuencia.

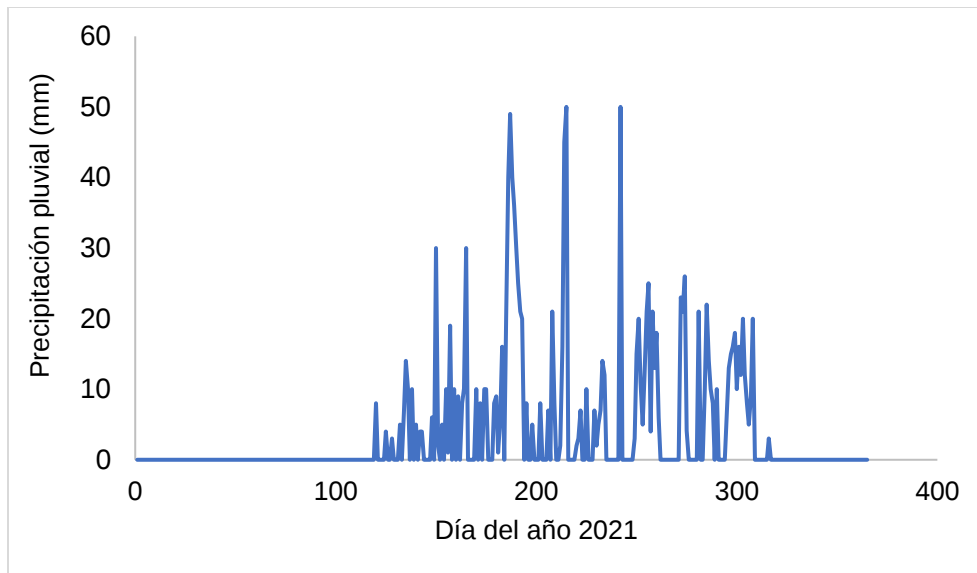


Figura 54. Valores de precipitación pluvial por día, durante un año igual a 1 367.2 mm.

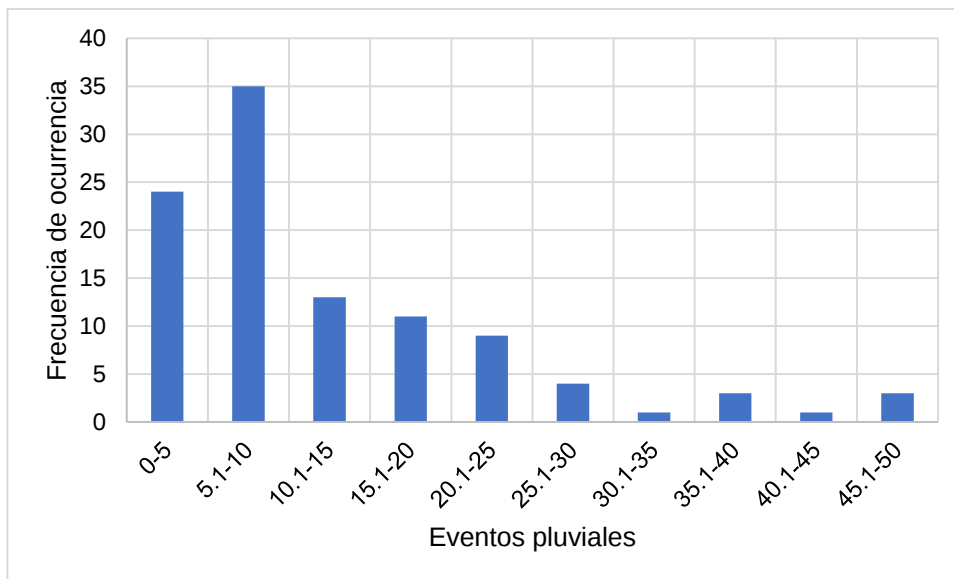


Figura 55. Eventos pluviales en categoría de 5 mm

3.6 Medición de la temperatura y humedad, en el aire y en el suelo

La temperatura y la humedad se midió en el aire y en el suelo. En la Figura 56, se observan los datos de los registros de temperatura y humedad en el aire (humedad relativa), del periodo enero a diciembre del año 2021. La temperatura del aire promedio fue igual 25 °C. La temperatura mínima y máxima fueron igual 6°C y 27°C, respectivamente. En el transcurso del mes de marzo a junio la temperatura osciló de

13°C a 27°C. En relación a la humedad del aire, el promedio fue de 41%. La humedad del aire mínima fue de 20% y la máxima de 83%. En los meses de junio y agosto se registraron los mayores valores humedad relativa, los cuales coinciden con la ocurrencia de los eventos pluviales.

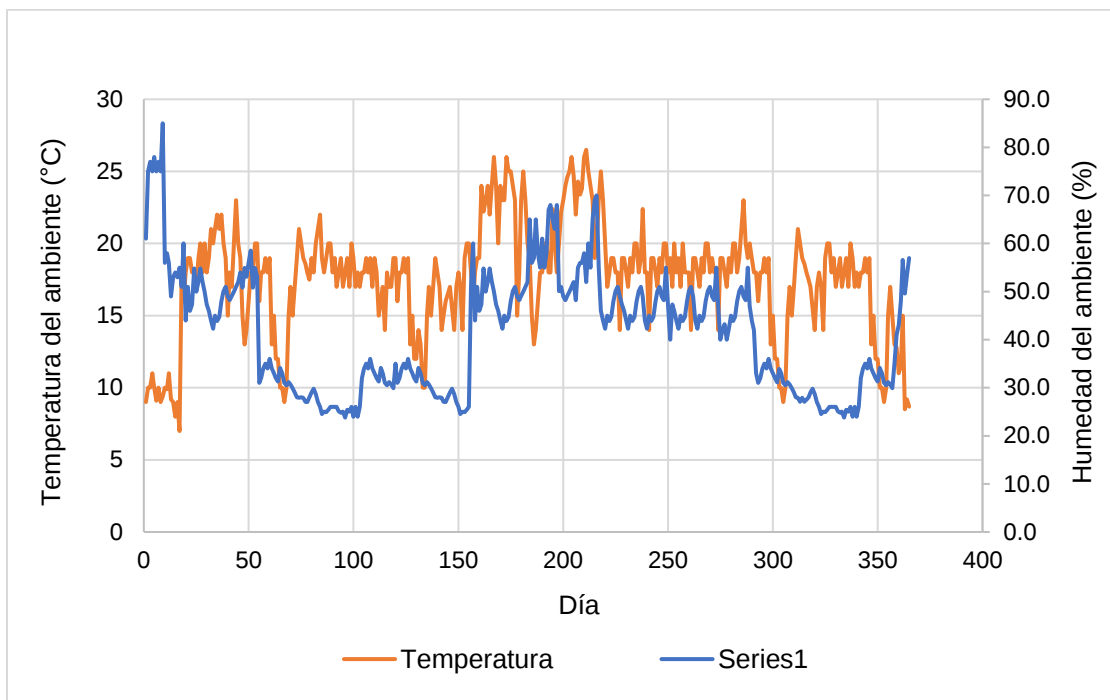


Figura 56. Humedad y temperatura del aire en los dos sitios con equipo Hubb.

Respecto a la temperatura y humedad del suelo, los datos se encuentran representados en la Figura 57. La temperatura promedio en el suelo fue igual a 22°C. La temperatura mínima y máxima en el suelo tuvieron valores de 5°C y 25°C, respectivamente. Las máximas se registraron en los meses de abril a junio, y las mínimas de diciembre a enero. La humedad del suelo promedio fue de 47%, este valor representa el porcentaje de contenido de agua que tiene el suelo de acuerdo con su capacidad volumétrica a saturación. La humedad del suelo mínima y máxima fueron igual a 20% y 83%, respectivamente. En los meses de julio a septiembre se registraron los valores máximos de temperatura y humedad del suelo.

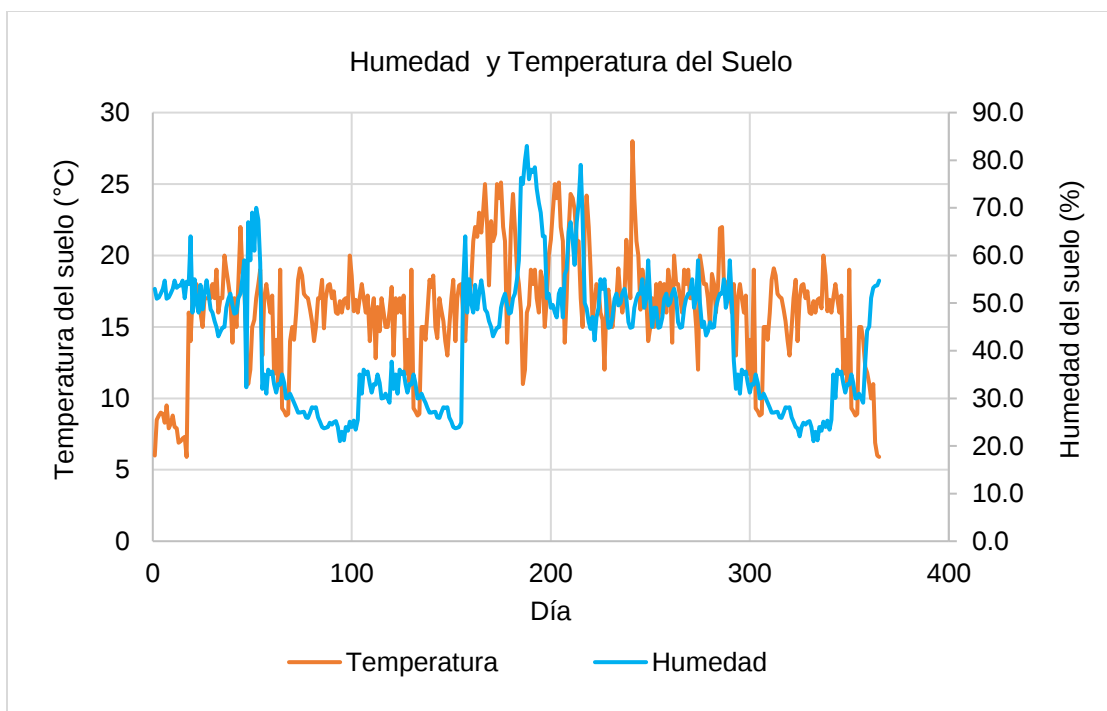


Figura 57. Humedad y temperatura del suelo obtenida con equipo hubb

3.7 Relación entre la infiltración y parámetros ambientales

Las matrices de correlaciones (Tabla 10 y 11) de las variables estudiadas de cada sitio de muestreo, del modelo de Horton, del suelo (temperatura y humedad) y del ambiente (temperatura y humedad relativa). Las matrices solo tienen valores de correlación en la parte inferior de la diagonal de valores igual a 1, porque la parte superior es un espejo de la inferior. Los valores marcados en negritas son los que resultaron significativos a $p < 0.05$.

Tabla 9. Matriz de correlación de Pearson en La Concordia.

	Arena	Limo	Arcilla	fo	k	Tm	fc	Fc	Ta	Ts	Ha	Hs
Arena	1.00											
Limo	-0.94*	1.00										
Arcilla	-0.68*	0.38	1.00									
fo	0.25	-0.29	-0.07	1.00								
k	0.59*	-0.62*	-0.27	0.74*	1.00							
Tm	-0.25	0.37	-0.12	-0.84*	-0.69*	1.00						
fc	0.54	-0.61*	-0.16	0.81*	0.70*	-0.76*	1.00					
Fc	-0.41	0.48	0.08	-0.57	-0.80*	0.78*	-0.52	1.00				

Ta	0.25	-0.04	-0.56	0.33	0.23	-0.07	0.18	-0.12	1.00			
Ts	0.09	0.13	-0.50	-0.60*	-0.45	0.56	-0.48	0.27	0.02	1.00		
Ha	-0.38	0.18	0.62*	-0.23	-0.24	0.06	-0.39	0.15	-0.70*	-0.33	1.00	
Hs	0.01	-0.20	0.41	0.30	-0.08	-0.36	0.33	0.11	-0.34	-0.46	0.47	1.00

*p<0.05. Coeficiente de Pearson.

Tabla 10. Matriz de correlación de Pearson en Tenanyecac

	Arena	Limo	Arcilla	fo	k	Tm	fc	Fc	Ta	Ts	Ha	Hs
Arena	1.00											
Limo	-1.00	1.00										
Arcilla	-0.66	0.63	1.00									
fo	-0.24	0.23	0.30	1.00								
k	-0.47	0.44	0.68	0.82	1.00							
Tm	0.30	-0.28	-0.52	-0.22	-0.41	1.00						
fc	0.54	-0.53	-0.57	0.39	0.15	0.27	1.00					
Fc	0.16	-0.14	-0.40	-0.06	-0.48	0.61	-0.16	1.00				
Ta	0.74	-0.75	-0.33	-0.19	-0.45	0.25	0.12	0.40	1.00			
Ts	0.34	-0.36	0.02	-0.26	-0.13	0.35	-0.06	0.06	0.52	1.00		
Ha	0.14	-0.14	-0.03	0.19	0.43	0.04	0.65	-0.70	-0.28	0.23	1.00	
Hs	0.37	-0.38	-0.09	0.29	0.38	0.35	0.59	-0.19	-0.03	0.39	0.72	1.00

En la figura 58 se presenta la tasa de infiltración con respecto a la clase textural del suelo de La Concordia y se observa que en un suelo franco arenoso se tendrá una tasa de infiltración de 12.19 cm/h, pero en un suelo donde existe un predominio de la fracción arena y que da lugar a una clase textural areno franco la infiltración es del 35.98 cm/h.

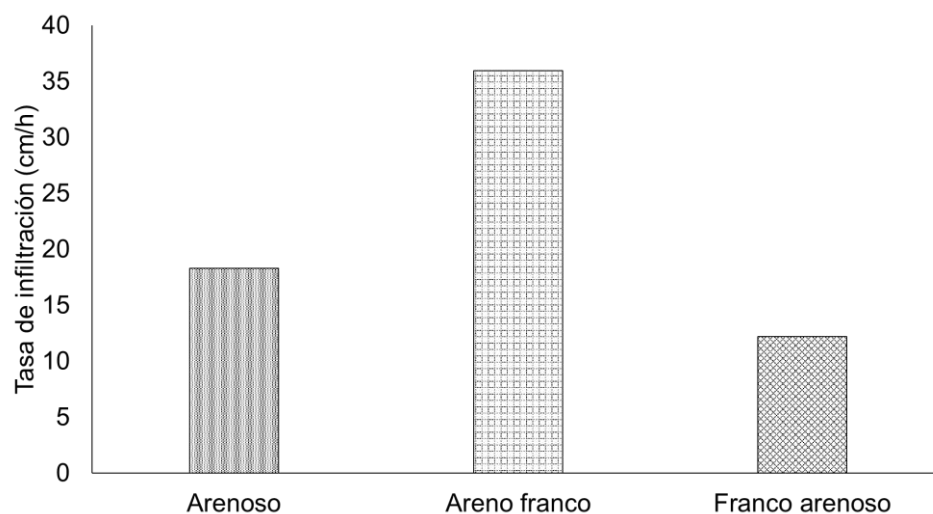


Figura 58. Tasa de infiltración (Ti) por clase textural del suelo, en La Concordia, Nativitas.

A diferencia de La Concordia, la clase textural del suelo de San Rafael permitió que en suelos franco arenosos la tasa de infiltración fue de 15.16 cm/h, no muy diferente para los suelos con la clase textural areno franco 13.5 cm/h y los suelos franco limosos con el 12.03 cm/h (Figura 59).

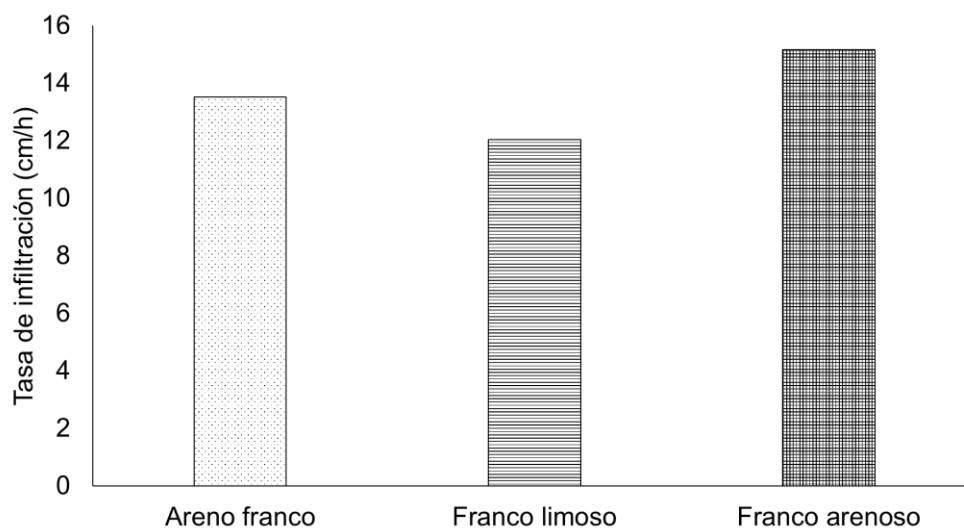


Figura 59. Tasa de infiltración (Ti) por clase textural del suelo en San Rafael.

IV DISCUSIÓN

4.1 Aplicación de encuestas

Los resultados obtenidos en las encuestas arrojaron que el 62% de las parcelas han tenido cultivo de maíz, 54.2% de alfalfa, 29.2% de haba, 25.0% avena y con menor porcentaje amaranto (8.3%) y ayocote (4.2%). En los sitios del estudio, los ejidatarios realizan labranzas como: rastra 95.8%, barbecho 66.7% y siembra 66.7%. En menor porcentaje, los entrevistados manifestaron que abonan la parcela (4.0%) y el 95.8% de los propietarios utilizan tractor para realizar sus actividades agrícolas. De acuerdo con Chyba *et al.*, (2014), un efecto notable del uso de la maquinaria agrícola sobre el estado físico del suelo es el aumento de la compactación del mismo, la cual reduce la porosidad e incrementa la densidad aparente de los suelos dando lugar a la reducción de la tasa de infiltración.

4.2.2 Medición de la infiltración

En el punto 3 de la Concordia el suelo es de clase textural de areno franca con policultivo de maíz y calabaza, como labranza realizan: barbecho, rastra, arar, surcar y siembra, en tiempo de sequía se riega cada 40 días con agua de río. En tiempo de lluvia los suelos se inundan, es decir, se sobresaturan. En la figura 29 correspondiente al punto 3, el cual tuvo los menores valores de las constantes de Horton, se observa una tasa de infiltración inicial (f_0) igual a 12.901cm/hr, coeficiente decaimiento de 0.6916 1/hr y una infiltración acumulada de 5.79cm. Este resultado se puede explicar con base en que el tipo de labor que se realiza, influye sobre la densidad aparente y produce compactación en los mismos de acuerdo con Martínez (2016), y también influye sobre la tasa de infiltración.

4.2.3 Análisis de datos de las mediciones de infiltración

Los resultados obtenidos de la medición de infiltración de agua en el suelo, en los dos sitios de medición, arrojaron valores de las constantes de Horton disímbolos solo en el caso de la tasa de infiltración constante f_c . Aunque los valores de las constantes f_0 , k y F_c en La Concordia fueron mayores que en San Rafael, tuvieron similitud, lo mismo también para el caso de f_c . Por lo que se podría considerar que los sitios de medición tienen constantes de infiltración del modelo de Horton similares, y ambos presentan

características, a pesar de las diferencias que tienen en cuanto al manejo agrícola y las propiedades texturales del suelo. Los valores cuasi iguales de los coeficientes de correlación en ambos sitios de medición, indican que el modelo de Horton es una alternativa para la modelación de la infiltración de agua en el suelo de los sitios de medición y que el método para calcular las constantes f_0 y k podría ser una opción para su cálculo. Sin embargo, proponemos que este método sea sometido a otras condiciones ambientales para su probidad. En relación a la capacidad del suelo para infiltrar agua al inicio de un evento pluvial o riego, los valores de f_0 , mostraron que los suelos de los sitios de medición tienen buena capacidad de infiltración, esto porque el valor mínimo de f_0 fue igual a 12.9 cm/h ó 129 mm/h, lo cual representa un evento pluvial de alta intensidad. Los promedios de las constantes de infiltración en los dos sitios de medición fueron mayores a los reportados por Parnas *et al.*, (2021), igual a 4.0 h⁻¹, esto podría ser debido a que estos autores midieron la infiltración en un suelo arenoso urbano, mientras que en este trabajo se realizó en un suelo sujeto a las actividades agrícolas.

4.3 Medición de la textura de suelo

Los suelos de los dos sitios se caracterizan por texturas areno franco y franco arenoso (Figura 58 y 59), estos últimos poseen mayor plasticidad y porosidad para almacenar agua en su interior, además de la presencia de raíces de los cultivos establecidos, las cuales ayudan a que la velocidad de infiltración sea más lenta que en aquellos suelos en donde predomina la fracción arena, tal es el caso del suelo de La Concordia de los diferentes sitios, que aunado a las prácticas culturales que se realizan a los suelos agrícolas (Tabla 3) presentan una mayor área de exposición a la infiltración en el perfil vertical del suelo (Muñoz-Villers *et al.*, 2015).

En San Rafael Tenanyecac, los suelos con textura franco arenosa permiten una tasa de infiltración de 15.16 cm/h, mientras que, en suelos de bosque con este tipo de textura se reporta una tasa de infiltración de 4.79 cm/h (Lozano-Trejo *et al.*, 2020), esta diferencia en cuanto al valor depende de las prácticas culturales que se llevan a cabo en los suelos agrícolas (Cuadro 4). Estos autores también mencionan que en suelos de bosque con textura areno franco la tasa de infiltración es de 6 cm/h y en los suelos de San Rafael en

esta misma textura se obtuvieron 14.5 cm/h; mientras que, en La Concordia la tasa de infiltración fue de 35.98 cm/h, mucho mayor, lo que significa que los suelos dedicados a la agricultura por varios años muestran una degradación importante, lo que ha propiciado que exista una disminución de la capacidad de infiltración.

En suelos agrícolas con un porcentaje de arena del 49.53%, arcilla de 18.29% y de limo 32.18% se reporta una tasa de infiltración de 12.42 cm/h (Gómez *et al.*, 2014), valor similar al de los suelos franco arenosos de La Concordia con 12.19 cm/h y los suelos franco limosos de San Rafael con 12.03 cm/h. Mientras que en suelos de pastoreo con un porcentaje de arena del 70.82%, arcilla del 4.10% y limo del 25.08%, estos mismos autores reportan que se tuvo una tasa de infiltración del 2.07 cm/h, valor muy por debajo de lo encontrado en los suelos de La Concordia y San Rafael, concluyen que los principales factores que influyen en una infiltración son el tipo de uso de suelo, tipo de cobertura vegetal, el contenido de arcilla, limo, la humedad del suelo y porosidad.

En un suelo cultivado con maíz se obtuvo una tasa de infiltración de 3.50 cm/h y con un porcentaje de arena del 25.63%, limo de 49.35% y arcilla del 24.56%, en este caso la infiltración está relacionada con la presencia de limo (da Silva *et al.*, 2010). Al respecto, la textura, estructura, contenido de materia orgánica y manejo se encuentran entre los factores que afectan más la tasa de infiltración (Tapia *et al.*, 2020).

4.4 Medición de la infiltración con lisímetro

Los resultados obtenidos de la infiltración del suelo mediante el lisímetro indica que el agua se infiltra en promedio un 17.04 % de las precipitaciones en el periodo de lluvia. Al respecto, Eilers *et al.* (2007), indicaron que la infiltración determinada por lisímetro no solo es predecible con la precipitación anual, sino depende de la distribución y magnitud de la caída de lluvia y el déficit que presente el suelo en cuanto a humedad, que precede a cada evento de lluvia. Este equipo, además, ayuda a cuantificar el agua que requieren los cultivos y permite que se monitoree la humedad presente en el perfil del suelo, lo que puede ser negativo o positivo,

4.5 Medición de la precipitación

Los resultados de las precipitaciones ocurridas durante el periodo evaluado permitieron comprobar la dispersión de la lluvia en conjunto con la medición de infiltración mediante el lisímetro. La lluvia depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y la humedad atmosférica (Luna *et al.*, 2009). En toda la zona que involucra a las dos comunidades la precipitación total fue de 1 367.2mm en la época de lluvia del 2021, siendo particularmente el día 3 de agosto del año 2021 cuando precipitaron 50mm.

4.6 Medición de la temperatura y humedad, en el aire y en el suelo

En las figura 56 y figura 57, se observa un comportamiento semejante entre los parámetros humedad y temperatura ambiental y del suelo, de acuerdo con Díaz y Alarcón (2018), existe una relación inversa entre la temperatura y la humedad; a medida que la temperatura aumenta, la humedad tiende a disminuir y viceversa, se identifica una zona donde convergen los dos parámetros, indicando en donde la temperatura se estabiliza en cuanto a la cantidad de agua contenida en las masas de aire, lo que favorece la condensación y da comienzo a la precipitación (temporada de lluvia). Involucrando a las dos comunidades La Concordia y San Rafael la temperatura promedio del aire fue de 25 °C, y la humedad de fue de 41%, mientras que, en el suelo la temperatura promedio fue de 22 °C y la humedad promedio de 47%, condiciones que influyen en la precipitación e infiltración de agua en el suelo.

4.7 Relación entre la infiltración y parámetros ambientales

Cuando se hizo la matriz de correlaciones se involucraron todas las variables consideradas en este trabajo, pero no todas las correlaciones son plausibles o fundamentadas, por ejemplo, las relaciones entre las variables del suelo y del ambiente, se consideraron que no son fundamentadas, porque, aunque las condiciones ambientales afectan al suelo en la meteorización, en un periodo corto de tiempo de un año no es evidente dicho efecto. Por lo tanto, la correlación significativa entre el contenido de arena y limo con la temperatura ambiente es casual. Contando los valores en negritas, las cuales indican que las correlaciones son significativas, se obtiene que en La

Concordia hubo 16 correlaciones significativas, mientras que en Tenanyecac hubo solo cinco.

En La Concordia, la arena tuvo correlación significativa con la constante de infiltración k , el limo con k y f_c y la temperatura del suelo tuvo correlación significativa con f_0 . Se observa en la Tabla 7, que entre las constantes del modelo de Horton tuvieron correlaciones significativas, exceptuando entre las constantes f_0 y F_c . Entre las variables de textura hubo correlaciones significativas, pero no así entre el limo y la arcilla. Las variables ambientales tuvieron correlación significativa entre la temperatura ambiente y la humedad relativa. No hubo correlaciones significativas entre las constantes de Horton con las variables de textura y condiciones ambientales. Entre las variables de textura solo la arena y el limo tuvieron correlación significativa, por el hecho de que una se obtiene a partir de la otra. Entre las constantes de Horton, solo resultó significativa la correlación entre k y f_0 esto posiblemente debido a que la segunda se calcula con la ecuación 9, en la cual se encuentra las constantes k , f_c y F_c . En el caso de las variables ambientales, hubo correlación significativa entre la humedad relativa y la humedad del suelo.

V CONCLUSIONES

La realización de las actividades académicas, de investigación documental y de campo resultaron de suma importancia para el conocimiento de la infiltración de agua en el suelo del área de estudio, valle de Puebla-Tlaxcala. Los objetivos planteados se cumplieron, redituando experiencias de aprendizaje situadas en el contexto del sistema ambiental local, que radican desde la colecta de información en campo, la perseverancia en la medición de la infiltración, el monitoreo de los eventos pluviales, hasta la síntesis en la modelación de los datos.

La hipótesis planteada que a la letra dice “La infiltración de agua en el suelo está influenciada por la textura del suelo y la temperatura, para el caso de una microcuenca del río Atoyac, Valle de Puebla-Tlaxcala” se corroboró mediante la realización de este trabajo de investigación, que indica que las matrices de correlaciones mostraron que las

constantes de Horton no tuvieron correlaciones significativas con las condiciones ambientales y del suelo, de manera concluyente, esto debido a que en el sitio La Concordia si se obtuvieron correlaciones significativas, mientras que en el sitio Tenexyecac no los hubo. Esto conduce a que se debe continuar investigando este tema, debido a que los cambios de temperatura del ambiente y del suelo debido al cambio climático, podrían afectar la infiltración de agua en el suelo.

La ecuación de Horton resultó una herramienta útil para la modelación de la tasa de infiltración de agua en los sitios de medición considerados en este trabajo. Las constantes del modelo tuvieron valores cuasi iguales en los dos sitios, fueron ligeramente mayores en La Concordia, excepto la constante f_0 , la cual indicó que los suelos tienen buena capacidad para infiltrar agua. Por otra parte, los valores de k obtenidos son comparables a los reportados en la literatura.

En los suelos de San Rafael la tasa de infiltración fue de 13.43 cm/h; mientras que, en los suelos de La Concordia fue de 18.7 cm/h, lo que puede deberse a la clase textural del suelo, además del manejo, el tipo de cultivo y las condiciones ambientales como la temperatura y humedad tanto del aire como del suelo.

VII REFERENCIAS

- Arreola Muñoz, A. (s/f) El Manejo integral de cuencas: limitaciones de una política sectorial para la gestión territorial del agua. Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica, A.C. (IDESMAC).
- American Society for Testing and Materials. (1994). Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. ASTM D3385-94.
- Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. Gaceta ecológica, (84-85). ISSN: 1405-2849
- Bateman, A. (2007). Hidrología Básica y Aplicada. Grupo de investigaciones en transporte de sedimentos . España.

- Berkes, Fikret; Colding, Johan, Folke, Carl, "Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change", Cambridge University Press, (2001).
- Blake, G. R., and Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In: A. Klute (Ed.). Methods of soil analysis, part 1: Physical and mineralogical methods, 2nd ed. (pp. 363–37).
- Calvante.M.A. (2007). El concepto moderno de sustentabilidad.Universidad Abierta Interamericana, Ref. Socioecología y desarrollo sustentable UAIS-SDS-100-002.
- Campos, D.F. (1998). Generalidades. En: Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. (pp. 1-30).
- Carlos-Gómez, G., Munive-Cerrón, R., Mallma-Capcha, T. y Orihuela-Villavicencio, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierra agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. Apunt.cienc.soc. 04 (01), 32-43.
- Comisión Europea. (2015). Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Bruselas. 2. 12.
- Comisión Nacional del Agua. (2011). Estudio Geohidrológico para la Reglamentación del Acuífero Alto Atoyac 2001, en el Estado de Tlaxcala, elaborado por GEOPSA S.A. de C.V.
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Reactivación de la Red de Monitoreo del Acuífero de la Cuenca Alto Atoyac, en el estado de Tlaxcala, realizado por UNITECNIA, S.A. de C.V.
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). (2017). Estadísticas del agua en México. Consultado en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del agua en México. Extraído desde: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Chow, V. T., Maidment, D.R. y L. Mays. (1994). Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill. Colombia.583 pp
- Chyba, j., Kroulík, M., Krištof, k., Misiewicz, P., Chaney, K. (2014) "Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate on grassland", *Agronomy Research*, 12(1): 59-64, 2014, ISSN: 1406-894X.

- Córdova-Rodríguez. J. y Rodríguez-Iturbe.I. (2015). Agua en Venezuela. En: El ciclo hidrológico y su significación ecológica. (pp. 81-94).
- Dirección general de estudios y proyectos de recursos naturales. Caracterización de los recursos naturales renovables para el alivio a la pobreza en sierra - microcuenca Shullcas, Junín. Lima: Instituto Nacional de Recursos Naturales; 1997.
- Estadísticas del agua en México. (2018). Comisión Nacional del Agua. Extraído desde: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Estadísticas del agua en México. (2017). Comisión Nacional del Agua. Extraído desde http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- FAO. (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Textura del suelo. Disponible en: <https://bit.ly/2MmvZe0>
- Fernández. A. (2012). El agua: un recurso esencial. Química Viva.
- Fetter, C.W. (2001) Applied Hydrogeology. Prentice- Hall. New Jersey.
- García. E. y Felipe. J.(,) Hidrología superficial. Extraído de: <https://es.slideshare.net/3duardoJose/1-la-cuenca-hidrologica>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2019.¿Qué es una cuenca?. Gobierno de México. Extraído desde: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- INEGI. Informe Técnico de la Cuenca Hidrológica Río Alto Atoyac. Humedales. 2019.
- Jaramillo. J. D., (2002) Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias. Medellín.
- Leff. E. 2002. Saber ambiental, sustentabilidad, racionalidad, complejidad,poder: Globalización, Ambiente y Sustentabilidad del Desarrollo.PNUMA. Argentina.
- Lesser – Carrillo. L., Lesser – Illades. J., Arellano-Islas, S y González-Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle Mezquital, México central. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 28 (3), 323-336.
- Li M., Liu T., Duan L., Luo Y., Ma L., Zhang J., Zhou Y., Chen Z. (2019). The scale effect of double-ring infiltration and soil infiltration zoning in a semi-arid steppe. Water, 11, 1457, doi:10.3390/w11071457
- Llerena, C. A. (9-12 junio 2003). Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el

- Perú. FAO Presentado en el Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA), Arequipa, , durante el Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M., Castañeda-Hidalgo, E., Díaz-Zorrilla, G., y Santiago-Martínez, G. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 57-66.
- Luna. B., Leopold, D. Kenneth, S. (2009). El Agua, Colección científica de Time Life, Editorial Lito Offset Latina S.A. México
- Maderey. (2005). Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico. Serie Textos Universitarios. Instituto UNAM GEOGRAFÍA.
- Maderey, L. y Jiménez, A. (2005). Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. primera. Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Mejía, J. A. (2006). Hidrología aplicada. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento Académico de Recursos de Agua y Tierra. Lima Perú.
- Martínez, C.J. (2012). Comparación de tecnologías de labranza en suelo Ferralítico Rojo de la finca Pulido,”, Revista Ingeniería Agrícola, 6(3): 60-63, 2016, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761
- Muñoz-Nava. H., Grada-Yautentzi, J., Batlle-Sales, J., García-Gallegos, E., and Valencia-Quintana, R. (2018). Quantification of wáter balance using a lysimeter in México. *International Journal of Water Resources and Environmentel Engineering*, 10 (3), 24-32.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Dawson, T., & Bruijnzeel, L. A. (2015). Efectos hidrológicos de la conversion del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque*, 36, 395-407.
- Musy, A. (2001). Cours "Hydrologie générale". Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement. Capítulo 1, 2, 3, 4 y 5.
- Morejón-Miranda. Y., Vega-Carreño. M., Escarré-Esteva. A., Peralta-Vital. J, Quintero-Silveiro. A y González-Piedra. J. (2015). Análisis de balance hídrico en cuencas

- hidrográficas de la Sierra de los Órganos. Ingeniería hidráulica y ambiental. ISSN 1680-0338
- Organización Meteorológica Mundial. 194. Glosario Hidrológico Internacional. Secretaria de la organización meteorológica mundial. Ginebra, Suiza.
- Ordoñez. J. (2011). Balance Hídrico Superficial. Cartilla técnica. Sociedad geográfica de Lima. ISBN: 978-9972-602-75-7
- Parnas, F. (2021). Evaluating three commonly used infiltration methods for permeable surfaces in urban areas using the SWMM and STORM. *Hydrology Research*, (52.1), pp.160-181.
- Plan de Acción de manejo integral (PAMIC). 2017. Cuenca del río Jamapa. Extraído desde:
[file:///C:/Users/usuario/Downloads/CGACC 2017 Plan de accion de manejo i
ntegral cuenca del rio Jamapa.pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/CGACC%202017%20Plan%20de%20accion%20de%20manejo%20integral%20cuenca%20del%20rio%20Jamapa.pdf)
- Raghunath, H. M. (2006). Hydrology Principles. Analysis. Design. New Age International.
- Ruiz, R. E. y Martínez, S. M (2003). Hidrología aplicada: Infiltración y humedad del suelo. Secretaria de Medio Ambiente Y recursos Naturales, 2003. La cuenca hidrográfica. Gobierno de México. Extraído desde:
[http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca hidrografica.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca_hidrografica.pdf)
- Semarnat. (2003). Reglamento interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tercera Sección del Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos.
- Servicio Nacional DE estudios Territoriales. (2005).
- Sing, H.V.P. (1989). Hydrologic Systems Vol II watershed modeling Prentice Hall, New Jersey. 320pp.
- Stockholm Environment Institute- Boston Tellus Institute. (2005).
- Suárez, J., Muñoz, H., Orozco, S., Sánchez, G., Ritter, W., Carreón, M.F., Muñoz, Ma. L y Treviño, J.M. (2009). Disponibilidad de agua y cambio climático global en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Gestión ambiental*. 18: 49-61.
- Tapia, R., Carmona, C. J., Martinelli, M. (2020). Velocidad de infiltración e infiltración base en dos comunidades arbustivas del desierto hiper árido de San Juan (Argentina). *Ecosistemas*, 29(3),2036.

- Torres, Q. E., Obando, G. E., Jiménez, B. G., Alayon, C. E y Garavito, B. F. (1995). Estudio de aguas subterráneas en la cuenca del río Chicú, Sabana de Bogotá, Colombia; Estudio de las aguas subterráneas de la cuenca del Río Chicú, Sabana de Bogotá, Colombia. OIEA.
- Vásquez. Absalón., Mejía. A., Faustino. J., Terán. R., Vásquez. I., Díaz. J., Vásquez. C., Castro. A., Tapia. M y Alcántara. J. (2016). Manejo y Gestión de cuencas hidrográficas. UNALM

VII ANEXOS

Encuesta a los propietarios de los terrenos o parcelas donde se realizaron las mediciones de infiltración.



CUESTIONARIO A LOS PROPIETARIOS DE LOS TERRENOS O PARCELAS DONDE SE
REALIZARON LAS MEDICIONES DE INFILTRACIÓN.



Nombre: _____

Nombre de parcela o besana: _____

1. ¿Cuál es el tamaño de su terreno?

2. ¿Cuál es el tipo de propiedad de su terreno?

3. ¿Qué tipo de cultivo tiene actualmente?

4. ¿Cuál es el historial de cultivos de la parcela o terreno?

5. ¿Cuáles son los pasos que utiliza para la preparación del terreno a cultivar?

6. ¿Qué tipo de labranza utiliza?

7. ¿Utiliza maquinaria?

Si _____ No _____

¿Cuál? _____

8. ¿Utiliza riego?

Si _____ No _____

9. ¿Qué tipo de riego utiliza?

10. ¿Fuente de agua que utiliza para riego?

11. ¿Cada qué tiempo riega su parcela o terreno?

12. ¿Lleva un control de riego de su parcela o terreno?
