

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE



**Fortalecimiento de las Capacidades de la Dirección General del Observatorio
de Amenazas y Recursos Naturales (DOA) para la Realización de Estudios
Meteorológicos**

POR

DIEGO ALESSANDRO SOSA ESCOBAR

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE



**Fortalecimiento de las Capacidades de la Dirección General del Observatorio
de Amenazas y Recursos Naturales (DOA) para la Realización de Estudios
Meteorológicos**

POR

DIEGO ALESSANDRO SOSA ESCOBAR

REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2026

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

ING. AGR. M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO

ING. AGR. MAECE. NELSON BERNABÉ GRANADOS ALVARADO

SECRETARIO

ING. AGR. M. Sc. EDGAR GEOVANNY REYES MELARA

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

ING. AGR. M. Sc. JOSÉ MAURICIO TEJADA ASENSIO

ASESOR INTERNO

ING. AGR. M. Sc. JOSÉ MAURICIO TEJADA ASENSIO

ASESOR EXTERNO

ING. AGR. ANTONIO MEDINA LIMA

**COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**

ING. AGR. JUAN GERARDO MARROQUÍN REINA

RESUMEN

El trabajo de pasantía de práctica profesional fue realizado en la Dirección del Observatorio de Amenazas (DOA) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), con apoyo directo de un equipo de profesionales de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador (UES). El objetivo del presente proceso fue proporcionar apoyo a la DOA en la actualización de sus bases de datos con el propósito de fortalecer su capacidad de realizar estudios meteorológicos. Esto se llevó a cabo a través del desarrollo de un levantamiento de datos y descripción de suelos en 10 de 25 sitios cercanos a las estaciones climatológicas del MARN a lo largo del país, que funcionaron como criterios para el diseño de un balance hídrico que permita realizar estimaciones más precisas de la humedad del suelo a lo largo del territorio; también, se recuperó la información climática, almacenada en formato físico de la estación agroclimática “La Providencia”, en San Luis Talpa, La Paz.

En el trabajo de campo, solamente fue posible dar cobertura a las estaciones climatológicas en la zona occidental del país. La información levantada fue sistematizada posteriormente en fichas informativas. Se elaboró un libro de cálculo con 6 propuestas de modelo de balance hídrico, seleccionándose, de entre ellos, al más adecuado para su utilización dentro de un marco de alerta temprana de sequía meteorológica. La información climatológica de “La Providencia” fue vaciada en un formato digital proporcionado por técnicos de la DOA, con el propósito de facilitar su uso al MARN y la UES en estudios pertinentes a futuro.

SUMMARY

The professional internship was carried out at the Threat Observatory Directorate (DOA) of the Ministry of Environment and Natural Resources (MARN), with direct support from a team of professionals from the Faculty of Agricultural Sciences of the University of El Salvador (UES). The objective of this process was to provide support to the DOA in updating its databases in order to strengthen its capacity to conduct meteorological studies. This was done by collecting data and describing soils at 10 of 25 sites near MARN weather stations throughout the country, which served as criteria for designing a water balance that would allow for more accurate estimates of soil moisture throughout the territory. Climate information stored in physical format at the “La Providencia” agroclimatic station in San Luis Talpa, La Paz, was also recovered.

In the fieldwork, it was only possible to cover weather stations in the western part of the country. The information collected was subsequently systematized in information sheets. A calculation book was prepared with six proposed water balance models, from which the most suitable one was selected for use within a meteorological drought early warning framework. The climatological information from La Providencia was entered into a digital format provided by DOA technicians, with the aim of facilitating its use by MARN and UES in relevant future studies.

AGRADECIMIENTOS

Lo primero de todo, es agradecer a la fuente de mi buena fortuna. Agradezco al Dios Abrahámico, cuyas bendiciones han llegado hasta mí a través de las oraciones y los buenos deseos de mi familia y demás seres queridos; y agradezco personalmente a Wuotan y Donar, quiénes han sostenido mi espíritu y han guiado mis decisiones a lo largo de este proceso de culminación de mi carrera.

Agradezco a mis padres, Carlos y Evelyn; a mis hermanos, Carlos y Hazel; y a mi abuela, Esther; así como a mis demás parientes, quienes, con toda sinceridad, han creído en mis esfuerzos y en mi potencial; y me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida como estudiante.

A mis tutores, José Tejada y Antonio Medina, así como al Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente y a la Gerencia de Meteorología por la oportunidad de llevar a cabo esta pasantía de práctica profesional; y a todos los amigos y colegas que tuve el honor de conocer durante su realización, quienes me han brindado su apoyo y me acogieron en un espacio de amistad sincera donde, en medio de la carga laboral del día a día, siempre existieron momentos de alegría.

Agradezco a Gerardo Marroquín, como mi gran amigo y colega en las ciencias agronómicas, que siempre me brindó su apoyo y consejo en aquellos momentos en que la duda me invadía; y con quien trabajamos mano a mano en el desarrollo del presente trabajo.

A Victoria, como mi gran amiga y psicóloga, quien ha sido mi guía y soporte para sobrellevar los distintos desafíos personales que se han presentado durante mis últimos años como estudiante universitario.

Finalmente, agradezco a todos los amigos que he hecho a lo largo de mi carrera y que todavía me acompañan en su culminación, pues han contribuido, de diversas maneras, al alcance de este logro tan importante para mi vida como profesional.

ÍNDICE

RESUMEN.....	iv
SUMMARY	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. INFORMACIÓN DE LA DIRECCIÓN GENERAL DEL OBSERVATORIO DE AMENAZAS Y RECURSOS NATURALES.....	3
3.1. datos generales	3
3.2. actividades actuales	7
4. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA.....	11
5. MARCO TEÓRICO.....	13
5.1. el balance hídrico	13
5.2. principios de los balances hídricos	13
5.3. modelos de balance hídrico	22
6. METODOLOGÍA.....	26
6.1. metodología de campo	26
6.2. metodología de gabinete	28
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
7.1. resultados de actividades planificadas.....	42
7.2. resultados de actividades adicionales	105
8. CONCLUSIONES.....	106
9. RECOMENDACIONES	107
10. BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE ANEXOS

11.1. A-1. formato utilizado para la descripción de suelos en campo.....	A- 1 -
11.2. A-2. formatos utilizados para las pruebas de infiltración	A- 4 -
11.3. A-3. ficha para descripción de suelos	A- 7 -
11.4. A-4. formato de ingreso de datos meteorológicos facilitado por la DOA	A- 9 -
11.5. A-5. vínculo de acceso a manual de usuario de libro de cálculo de balances hídricos	A- 13 -

11.6. A-6. nivel de facilidad de comprensión de productos elaborados de la DOA.....	A- 14 -
11.7. A-7. proyecto interinstitucional MARN-UES (establecimiento de una red interinstitucional de monitoreo de amenazas hidrometeorológicas para la agricultura de granos básicos).....	A- 15 -
11.8. A-8. carta de solicitud de préstamo de equipo de campo	A- 17 -
11.9. A-9. fotografías de actividades adicionales a la pasantía	A- 18 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de la Gerencia de Meteorología*	9
Figura 2. Tipos de agua, estados de humedad y disponibilidad de agua en el suelo	18
Figura 3. Mapa de sitios estudiados en el levantamiento de suelos	42
Figura 4. Descripción de un perfil de suelo expuesto a través de una calicata, Cantón Las Pilas, San Ignacio, mayo 2023	43
Figura 5. Ejecución de pruebas de infiltración, Cantón El Zapote, Nueva Concepción, marzo 2023	43
Figura 6. Digitación de libretas climatológicas de estación "La Providencia", Universidad de El Salvador, San Salvador, abril 2024.....	78
Figura 7. Hoja de ingreso de determinación de información edáfica.....	79
Figura 8. Hoja de ingreso y determinación de información climática	80
Figura 9. Hoja de datos de cultivos comunes	81
Figura 10. Hoja de datos de infiltración y escorrentía diaria.....	82
Figura 11. Encabezado en hoja de ficha hídrica.....	83
Figura 12. Pie de hoja de ficha hídrica	84
Figura 13. Hoja de comportamiento de variables según modelo de balance hídrico	85
Figura 14. Evapotranspiración real, abril 2022. Prueba en condiciones estándar, sin cultivo	86
Figura 15. Precipitación infiltrada, abril 2022. Prueba en condiciones estándar, sin cultivo	87
Figura 16. Evapotranspiración potencial, abril 2022	87
Figura 17. Lámina hídrica almacenada según modelo, abril 2022.....	88
Figura 18. Evapotranspiración real, julio 2022. Prueba en condiciones estándar, cultivo de maíz	89
Figura 19. Evapotranspiración potencial y evapotranspiración del cultivo de maíz, en etapa de desarrollo y floración; julio 2022	89
Figura 20. Lámina hídrica almacenada según modelo, julio 2022. Prueba en condiciones estándar, cultivo de maíz.....	90
Figura 21. Precipitación incorporada al suelo según modelo de infiltración, julio 2022.....	90
Figura 22. Precipitación bruta infiltrada e infiltración según S&L, abril 2022. Prueba en condiciones reales	91
Figura 23. Lámina útil almacenada según modelos Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	91
Figura 24. Evapotranspiración real según modelos Scho y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	92
Figura 25. Lámina útil almacenada según modelos Scho y Scho T&M (A), septiembre 2022. Prueba en condiciones reales, cultivo de maíz	93
Figura 26. Precipitación infiltrada según S&L, septiembre 2022. Prueba en condiciones reales.....	93

Figura 27. Lámina evaporable almacenada según modelos Scho y Scho-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	94
Figura 28. Evapotranspiración real según modelos Scho y Scho-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	94
Figura 29. Lámina útil almacenada según modelos Scho y Scho-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	95
Figura 30. Evapotranspiración real según modelos Scho y T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	96
Figura 31. Lámina útil almacenada según modelos Scho y T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	97
Figura 32. Evapotranspiración potencial según el método de Hargreaves, abril 2022	97
Figura 33. Lámina evaporable almacenada según modelos T&M (A) y T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	98
Figura 34. Evapotranspiración real según modelos T&M (A) y T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	98
Figura 35. Lámina útil almacenada según modelos T&M (A) y T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	99
Figura 36. Evapotranspiración real según modelos Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	100
Figura 37. Lámina útil almacenada según modelos Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	101
Figura 38. Lámina evaporable almacenada según modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales	102
Figura 39. Evapotranspiración real según modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	102
Figura 40. Lámina útil almacenada según modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales.....	103

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estaciones climatológicas convencionales de El Salvador*	6
Cuadro 2. Servicios de información geoambiental tarifada	10
Cuadro 3. Contenido de agua a CC y PMP en distintas clases texturales en porcentaje gravimétrico, según distintos autores.....	19
Cuadro 4. Velocidad de infiltración base según la textura del suelo.....	21
Cuadro 5. Clasificación de suelos según conductividad hidráulica saturada (Ksat).....	22
Cuadro 6. Coeficiente de infiltración según la pendiente del terreno	30
Cuadro 7. Coeficiente de infiltración según la cobertura vegetal	31
Cuadro 8. Ficha hídrica según el balance hídrico diario de Schosinsky	33
Cuadro 9. Balance hídrico diario de Thornthwaite & Mather, mayo-junio	36
Cuadro 10. Ficha hídrica según el balance hídrico diario de Thornthwaite & Mather, modificado por Fernández-Long et al.....	37

Cuadro 11. Ficha hídrica según el balance hídrico diario de Thornthwaite & Mather, modificado por Botey et al.	38
Cuadro 12. Infiltración base de los sitios estudiados.....	73
Cuadro 13. Conductividad hidráulica de los sitios estudiados.....	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula simplificada del coeficiente de humedad, Schosinsky (2006).....	23
Ecuación 2. Fórmula simplificada de la evapotranspiración potencial real, Schosinsky (2006).....	23
Ecuación 3. Modelo directo de reabastecimiento de lámina, según Thornthwaite & Mather (1955).....	24
Ecuación 4. Modelo exponencial de agotamiento de lámina, según Thornthwaite & Mather (1955).....	24
Ecuación 5. Modelo exponencial de agotamiento de lámina, modificado por Fernpandez Long et al. (2012).....	25
Ecuación 6. Modelo exponencial de agotamiento de lámina, modificado por Botey et al. (2011).....	25
Ecuación 7. Modelo de comportamiento de lámina húmeda de Thornthwaite (1948).....	28
Ecuación 8. Retención foliar de la precipitación (Schosinsky & Losilla 2000).....	29
Ecuación 9. Infiltración pluvial (Schosinsky & Losilla 2000).....	30
Ecuación 10. Coeficiente de infiltración del suelo (Schosinsky & Losilla 2000).....	30
Ecuación 11. Coeficiente de infiltración según la textura del suelo, Schosinsky & Losilla (2000).....	30
Ecuación 12. Escorrentía superficial (Schosinsky & Losilla 2000).....	31
Ecuación 13. Coeficiente de humedad previo a la evapotranspiración (Schosinsky 2006).....	31
Ecuación 14. Coeficiente de humedad posterior a la evapotranspiración (Schosinsky 2006).....	31
Ecuación 15. Evapotranspiración real tentativa para un suelo, previo a su desecación (Schosinsky 2006).....	32
Ecuación 16. Evapotranspiración potencial real (Schosinsky 2006).....	32
Ecuación 17. Humedad disponible (Schosinsky 2006).....	32
Ecuación 18. Evapotranspiración real según Schosinsky (2006).....	32
Ecuación 19. Humedad del suelo al final del día (Schosinsky 2006).....	32
Ecuación 20. Recarga hídrica potencial (Schosinsky 2006).....	33
Ecuación 21. Cambio de almacenamiento de humedad (Thornthwaite & Mather 1955).....	34
Ecuación 22. Evapotranspiración real según Thornthwaite & Mather (1955).....	35
Ecuación 23. Déficit de humedad por diferencia entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite & Mather 1955).....	35
Ecuación 24. Déficit de humedad por diferencia entre las pérdidas potenciales y el cambio de almacenamiento (Thornthwaite & Mather 1955).....	35
Ecuación 25. Exceso de humedad en el suelo (Thornthwaite & Mather 1955).....	35
Ecuación 26. Capacidad de campo disponible (Fernández Long et al. 2012).....	36
Ecuación 27. Límite de desecamiento (Fernández Long et al. 2012).....	36
Ecuación 28. Reserva hídrica máxima del suelo (Botey et al. 2011).....	38

1. INTRODUCCIÓN

El clima tiene influencia sobre factores hidrológicos, biológicos y económicos, tales como los regímenes en las cuencas fluviales; en los ciclos de las poblaciones; en la etología de los organismos, en el ciclo anual de la producción agrícola y hasta en las costumbres y culturas de los pueblos (Roldán et al., citado por Goyal y Ramírez Builes s.f.).

El conocimiento de la oferta ambiental de una determinada zona, es un componente integrador, cuando se pretende establecer unidades productivas, o unidades de investigación en diferentes disciplinas (Baldión y Guzmán, citados por Goyal y Ramírez Builes s.f.). La Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DOA) tiene, entre sus múltiples funciones, la observación sistemática de amenazas relacionadas con fenómenos meteorológicos, con el propósito de apoyar en la gestión ambiental y de riesgos (MARN s.f.).

Para aumentar la eficacia de sus estudios territoriales, la DOA busca mejorar sus recursos informativos a través de la realización de estudios y convenios que le permitan enriquecer su base de datos con información más cercana a la realidad de los distintos fenómenos y eventos naturales que ocurren en nuestro país. Parte de estos esfuerzos se vieron materializados en la realización de un estudio de suelos en 25 sitios cercanos a las estaciones climatológicas principales con el propósito de contar con nuevas variables de análisis para implementar un balance hídrico estimado según las propiedades físicas de cada lugar y que pueda ser aplicado en estudios afines.

También, se buscó mejorar la cobertura de su red de estaciones climatológicas a través de la recuperación del antecedente histórico de la estación climatológica “La Providencia”; ambas actividades realizadas en convenio con la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

El presente proceso de pasantía profesional tuvo, como fin, proporcionar apoyo a la DOA en la actualización de sus bases de datos a través de la participación en el estudio de las propiedades de los suelos del país para la implementación de un nuevo modelo de balance hídrico propuesto y la recuperación de la información climática de la estación “La Providencia”, pretendiendo, con ello, fortalecer sus capacidades para la gestión de estudios climatológicos.

2. OBJETIVOS

objetivo general

Proporcionar apoyo a la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales en la actualización de sus bases de datos a través de la participación en proyectos de campo y recuperación de información climática, con el propósito de fortalecer su capacidad de llevar a cabo estudios meteorológicos.

objetivos específicos

Acompañar a la toma de muestras y descripción de suelos en 25 sitios en un radio de 5 a 15 km de las estaciones meteorológicas del país y sistematización de resultados.

Implementar un balance hídrico que tome en cuenta cada una de las propiedades físicas del suelo estudiadas, con capacidad de ser utilizado en estudios afines.

Digitalizar la información climática histórica de las libretas meteorológicas de la estación agrometeorológica “La Providencia”, del período septiembre 1976 a febrero de 2012, en un archivo de uso público para fines académicos y profesionales.

3. INFORMACIÓN DE LA DIRECCIÓN GENERAL DEL OBSERVATORIO DE AMENAZAS Y RECURSOS NATURALES

3.1. datos generales

3.1.1. localización. La Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales se encuentra ubicada en el km. 5 ½ de la Carretera a Santa Tecla, Avenida Las Mercedes, en el municipio de San Salvador, coordenadas 13°41'15.1"N 89°13'52.1"W.

3.1.2. antecedentes.

3.1.2.1. reseña histórica del servicio meteorológico de el salvador (garcía et al. 2010). El 1° de enero 1889, durante la presidencia del Gral. Francisco Menéndez, se efectuaron las primeras observaciones meteorológicas en el observatorio ubicado en el Instituto Nacional de San Salvador. Al Dr. Darío González le corresponde el dar estos pasos iniciales en la medición de algunos elementos atmosféricos de suprema importancia en las actividades de los seres humanos.

El 25 de octubre de 1890, se decreta oficialmente la fundación del Observatorio Astronómico y Meteorológico como institución separada y conducida por el Sr. Carlos Meyer, peruano. Dos meses después, asume la dirección del Observatorio el Dr. Alberto Sánchez y se publica el primer "Almanaque Salvadoreño".

En los veinte años subsiguientes, se amplía la funcionalidad del observatorio por medio de la publicación de anuarios, la instalación de estaciones pluviométricas y la preparación de estadísticas climáticas que fueron difundidas incluso en Europa.

En 1911, el observatorio se anexa a la Dirección General de Estadística, dirigido por el Ing. Pedro S. Fonseca. Durante los siguientes treinta años, continúa la expansión de las tareas meteorológicas operacionales e investigativas, tales como la puesta en funcionamiento de una estación sismológica en 1930, la adquisición de un reloj de péndulo especial para la corrección continua de la hora civil, la operación de una estación aeronáutica y globos de hidrógeno (a cargo de Pan American Airways) en el Aeropuerto de Ilopango, la publicación de nociones de meteorología por el Sr. Cardona Lazo y el funcionamiento del primer equipo de telecomunicaciones meteorológicas RCA.

En 1942, se erigen las estaciones climatológicas de Santa Tecla, San Andrés y Santa Cruz Porrillo.

En la década de 1950, se instalan estaciones de medición de lluvia, temperatura y viento a escala nacional; se funda el Servicio Meteorológico Nacional por el presidente, Cnel. Oscar Osorio, el 1° de enero de 1953,

adscrito al Ministerio de Defensa; y se capacita a nivel académico a algunos becarios salvadoreños en Alemania, Argentina y México; y se incorporan algunos meteorólogos alemanes dentro de la misión alemana del Año Geofísico Internacional.

En 1955, El Salvador se adhiere a la Organización Meteorológica Mundial, al ratificar el convenio de la misma el 16 de marzo.

En 1967, la Organización Meteorológica Mundial comenzó la ejecución del Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, lo que hizo posible la ampliación de las redes hidrométricas y meteorológicas, la investigación, la capacitación de técnicos y la cooperación con la comunidad meteorológica/hidrológica internacional.

En la década de 1970, el Servicio Meteorológico se convierte en el más avanzado de Centro América e ingresa en el aprovechamiento de la tecnología satelital al abrirse, en 1971, la primera estación de seguimiento de satélites meteorológicos en Ilopango, además del equipamiento con su primer receptor de radio-facsímil meteorológico en el mismo lugar.

En 1983, se dio la fusión de los Servicios Meteorológico e Hidrológico (SEMEH), servicio unificado dependiente del Centro de Recursos Naturales del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Durante la década de 1980, existieron limitantes y pérdida de varias estaciones meteorológicas y de vidas humanas por el conflicto armado, lo cual provocó una disminución en la calidad de los productos y servicios.

Es relevante la apertura de actividades de cómputo electrónico a finales de 1987, que fueron definitivamente operacionales en el primer trimestre de 1989, como respaldo a la investigación científica atmosférica y a la planificación de diversas ramas de la economía nacional.

Desde junio del año 1995, se cambió el nombre a División de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección General de Recursos Naturales Renovables (DGRNR), perteneciente al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

A mediados de los noventa, se perfiló un nuevo proyecto regional financiado por Finlandia, el Proyecto FINNIDA, que rehabilitó en parte la red de monitoreo; en especial, se instalaron tres estaciones automáticas, se fortaleció con sistemas de cómputo modernos y apoyo económico de becas en el Centro Regional de Formación en Meteorología de la OMM en Costa Rica.

El desastre dejado por el Huracán Mitch, en el año 1998, dejó en evidencia las limitantes y necesidades de las instituciones a cargo del monitoreo meteorológico e hidrológico, pues no contaban con los recursos

necesarios para llevar a cabo un adecuado monitoreo, vigilancia y alertamiento. Posterior a Mitch, la DMH recibió apoyo de la USGS, en especial para el área de Hidrología, montándose el primer Centro de Pronóstico Hidrológico.

Posteriormente a los terremotos de enero y febrero de 2001, la cooperación internacional apoyó en la formación del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) adscrito al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), el cual, en el año 2007 se convirtió una Dirección General. Desde entonces se fortaleció con una adecuada conexión en red en todas sus áreas de trabajo, internet dedicado las 24 horas, sostenibilidad de la red de monitoreo existente, mejora de software y hardware, entre otros.

3.1.3. Recursos.

3.1.3.1. instalaciones y equipos. La Gerencia de Meteorología cuenta con veinticinco estaciones climatológicas convencionales, distribuidas a lo largo del territorio del país, donde un observador meteorológico toma datos diariamente en tres horas fijas establecidas (7 a.m., 2 p.m. y 9 p.m.), para la elaboración de reportes climatológicos. Estas se encuentran clasificadas como estaciones tipo A y tipo B, siendo la diferencia entre ellas que las primeras cuentan con equipo medidor y registrador, mientras que las últimas carecen de equipos de registro.

Entre las estaciones tipo A, cinco de ellas también cumplen el rol de estaciones sinópticas, cuya función principal es emitir reportes sinópticos cada tres horas, los cuales proveen la información necesaria para la elaboración de pronósticos. También emiten reportes meteorológicos de aeródromo (METAR) cada hora, que son de utilidad para el tráfico aéreo.

En el cuadro 1 se muestran todas las estaciones climatológicas convencionales, junto con su tipo, su ubicación y elevación.

Las estaciones climatológicas tipo A cuentan con un conjunto básico de equipos consistente en un termómetro de máxima y uno de mínima, un psicrómetro, un pluviómetro, un termógrafo y un higrógrafo, entre otros equipos complementarios. Las estaciones tipo B cuentan con este mismo conjunto base, exceptuando los equipos registradores (termógrafo e higrógrafo). En todos los sitios también se cuenta con una estación telemétrica, la cual recolecta datos meteorológicos a cada hora y los almacena durante siete días antes de ser borrados.

Cuadro 1. Estaciones climatológicas convencionales de El Salvador*

Estación	Tipo de estación	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)
Güija	A	-89.4691	14.2284	449
Finca Los Andes	A	-89.6283	13.8748	1752
Candelaria de la Frontera	B	-89.6559	14.1193	743
Planes de Montecristo	A	-89.3606	14.3989	1857
Santa Ana - UNICAES	A, sinóptica	-89.5493	13.9827	665
Chorrera del Guayabo	A	-88.7559	13.9878	205
Sensuntepeque	B	-88.6448	13.8713	695
Cerrón Grande	A	-88.8979	13.9342	207
Cojutepeque	B	-88.9263	13.7206	894
Nueva Concepción	A	-89.2883	14.1254	327
La Palma	A	-89.1591	14.2783	1024
Las Pilas	B	-89.0964	14.3725	1966
Ahuachapán	A	-89.8601	13.9431	732
La Hachadura	B	-90.0860	13.8597	43
San Andrés	A	-89.4038	13.8065	480
Chiltiupán	B	-89.4799	13.5924	671
San Miguel - UES	A, sinóptica	-88.1591	13.4389	108
La Unión CORSAIN	A, sinóptica	-87.8147	13.3249	12
Aeropuerto de Ilopango	A, sinóptica	-89.1170	13.6974	624
Acajutla Puerto Nuevo	A, sinóptica	-89.8335	13.5764	15
Los Naranjos	A	-89.6741	13.8749	1450
Santiago de María	A	-88.4716	13.4796	917
Puente Cuscatlán	B	-88.5943	13.5984	33
San Francisco Gotera	A	-88.1085	13.6923	273
Perquín	B	-88.1584	13.9610	1166

*Díaz, F. 27 mar 2025. Solicitud de información sobre estaciones meteorológicas convencionales (WhatsApp). San Salvador, El Salvador, MARN.

En las oficinas centrales del MARN se encuentra el Observatorio de Amenazas, donde se recibe todos los datos recolectados por los observadores climatológicos y las estaciones telemétricas. Éste se encuentra equipado con antenas receptoras de información y equipo informático utilizado para la sistematización y procesamiento de la información climática y el monitoreo en tiempo real de eventos atmosféricos.

humanos. La Gerencia de Meteorología emplea observadores climatológicos, observadores aerosinópticos y costeros, pronosticadores, inspectores de estaciones, climatólogos, agroclimatólogos, oceanólogos, estadísticos, ingenieros informáticos y personal auxiliar de campo.

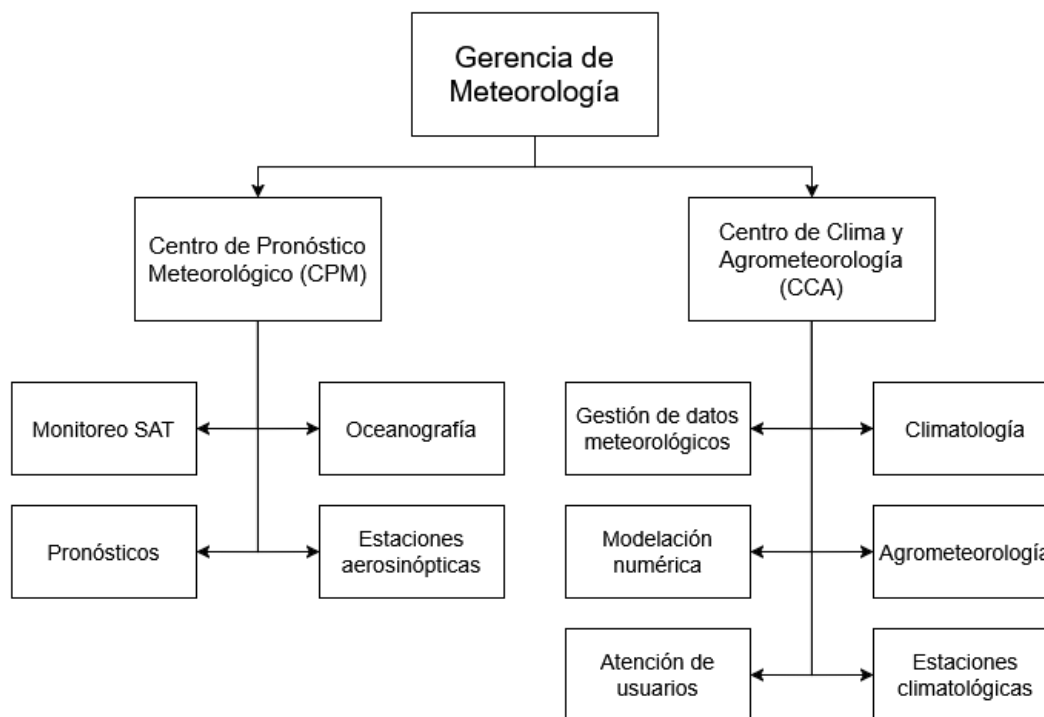
3.2. actividades actuales

3.2.1. producción principal y otras. Entre sus competencias, la DOA, se encarga de la obtención y sistematización de información meteorológica y climática. Esta es organizada y estudiada para la realización de los denominados “servicios climáticos de productos elaborados”, consistentes en publicaciones y documentos que ofrecen análisis climatológicos de distinta índole. Estos son:

- **Perspectiva del clima:** documento en que se desarrolla el pronóstico correspondiente a los tres o cuatro meses posteriores a su fecha de publicación. Se aborda preliminarmente la ocurrencia de los fenómenos atmosféricos esperados (tales como olas de calor o huracanes), con base en registros y modelos climáticos.
- **Resúmenes climatológicos (anuales y mensuales):** Son documentos que describen el comportamiento de las principales variables meteorológicas, registradas diariamente a través de las estaciones de monitoreo en todo el país, a lo largo del año; en una escala mensual o anual. También se detallan los eventos atmosféricos más relevantes.
- **Boletines agrometeorológicos:** publicación decádica (diez días) donde se detalla el comportamiento de las variables climatológicas durante el período de interés, en comparación con los valores climáticos normales; y se presentan estimaciones del comportamiento de las variables para la década siguiente. También se informa acerca del estado de algunos cultivos agrícolas establecidos.
- **Boletín de temperaturas extremas:** se informa de la ocurrencia de olas de calor y su permanencia y cese a lo largo del territorio nacional.
- **Informe y boletín ENOS:** documentos en que se muestra el monitoreo de las variables atmosféricas y oceánicas que determinan el establecimiento del fenómeno ENOS en sus condiciones cálida y fría (El Niño y La Niña respectivamente).

- **Informes de sequía:** Informes especiales en los que se reporta la ocurrencia de días secos consecutivos durante la época lluviosa en las distintas regiones del país, alertándose del posible establecimiento de sequías.
- **Informes de inicio de época lluviosa y seca:** se determina el período de transición y el establecimiento de las épocas lluviosa y seca en las distintas regiones del país, según el comportamiento de las precipitaciones en sus períodos correspondientes.
- **Pronósticos:** Diariamente, se elaboran pronósticos generales del tiempo para las próximas 48 horas (día presente y día siguiente); así como también, pronósticos marítimos, donde se informa de las condiciones del tiempo atmosférico y marítimas presentes en los puertos de Acajutla y La Unión y a lo largo de la costa en todo el país. También, se emite un documento de pronóstico de las condiciones de la última semana del año, cuando el MARN entra en su período de vacaciones. Cuando la situación lo amerita, se elaboran informes especiales que comunican de cambios repentinos en el tiempo, que difieren demasiado de los pronósticos emitidos.
- **Resúmenes sinópticos:** Son documentos cortos que describen los eventos atmosféricos relevantes ocurridos a lo largo de las 6 pentadas de un mes dado y los impactos que estos han tenido.

3.2.2. situación administrativa. Dentro de la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DOA), se encuentra la Gerencia de Meteorología, la cual se organiza de la siguiente manera:



*Figura 1. Organigrama de la Gerencia de Meteorología**

3.2.3. servicios de información geoambiental tarifada. La DOA ofrece al público datos sistematizados y procesados, así como servicios de asesoría y asistencia técnica correspondientes a las distintas áreas bajo su cargo. Estos pueden solicitarse vía correo electrónico a través de la dirección “doagestiondedatos@ambiente.gob.sv”.

A la Gerencia de Meteorología corresponde el ofrecimiento del siguiente conjunto de servicios:

*Medina Lima, A. 25 feb 2025. Organigrama de la Gerencia de Meteorología (WhatsApp). San Salvador, El Salvador, MARN.

Cuadro 2. Servicios de información geoambiental tarifada

Servicio	Precio
Certificaciones técnicas para fines judiciales y seguros	\$50.85
Serie anual de datos climáticos diarios del año anterior. Cada variable por estación (lluvia, temperatura, humedad, viento, luz solar, etc.).	\$135.60
Serie mensual de datos meteorológicos diarios. Cada variable por estación (lluvia, temperatura, humedad, viento, luz solar, etc.).	\$40.68
Dato meteorológico diario. Cada variable por estación (lluvia, temperatura, humedad, viento, luz solar, etc.).	\$2.03
Reporte anual de climatología mensual del año, con mapas y tablas.	\$17.63
Perfil climatológico de zona	\$40.68
Caracterización climatológica integral (clima pasado/futuro), día/hombre	\$40.68
Cálculo de intensidades máximas absolutas por año (actualizadas) con IDF (curva intensidad, duración y frecuencia).	\$135.60
Cálculo de intensidades máximas absolutas por año (históricas) con IDF (curva intensidad, duración y frecuencia).	\$33.90
Reporte mensual de velocidad, altura de oleaje y corrientes marinas	\$39.55
Mapas de escenario de cambio climático	\$12.20
Reporte anual de valores mensuales de calidad del aire (PM10), 10 micrones	\$39.55
Reporte anual de valores mensuales de calidad del aire (PM2.5), 2.5 micrones	\$39.55
Reporte anual de valores mensuales de dióxido de nitrógeno	\$39.55
Reporte anual de valores mensuales de plomo en aire	\$39.55
Reporte anual de valores mensuales de ozono	\$39.55
Asesorías climáticas para proyectos públicos o privados	\$169.50
Inspección meteorológica in situ, sin transporte	\$61.02
Charlas técnicas, hora/hombre	\$84.75
Seminarios, conferencias, talleres o cursos; día/hombre	\$84.75
Estudios específicos de oceanografía, día/hombre	\$169.50

Fuente: Tomado de MARN 2023

4. ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA

La Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, en su labor de informar acerca del estado atmosférico y de otros parámetros ambientales, lleva a cabo la estimación de la humedad del suelo como parte de un protocolo de alerta de sequía meteorológica. Para ello, hacen uso del método del balance hídrico, basándose en el modelo de Thornthwaite (1948), asumiendo una capacidad de almacenamiento hídrico de 100 mm en el suelo y utilizando los datos recolectados en cada estación climatológica y pluviométrica del país. De los resultados obtenidos de dicho proceso, se calculan índices de humedad correspondientes a la zona de influencia de cada estación, con los que se elabora posteriormente un mapa de disponibilidad hídrica en todo el territorio nacional.

Ésta es una labor que requiere de la disponibilidad de datos de calidad, puesto que, en la medida que la información recolectada sea más precisa, los valores obtenidos de su procesamiento serán igualmente confiables. Ante esto, la DOA cuenta con tres desafíos importantes a superar. Respecto a la disponibilidad de información climática, carecen de los datos climáticos históricos correspondientes a la estación agroclimática “La Providencia” (departamento de La Paz, municipio de San Luis Talpa, cantón Tecualuya), los cuales se encuentran preservados en formato físico por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador; vacío que subsanan a través de interpolaciones de los datos de las otras estaciones climatológicas. Cabe mencionar que dicha estación fue clausurada en febrero de 2012, por lo que no se toman más datos climatológicos desde entonces, hasta la fecha. En el sitio de “La Providencia” solamente funciona una estación telemétrica perteneciente al MARN, la cual toma datos meteorológicos a cada hora y se encuentran disponibles al público durante siete días, para luego ser guardados en una base de datos digital de la DOA. Para determinar el clima de una región, la OMM establece el criterio de utilizar valores promedio de datos tomados durante “el período de 30 años más reciente, que concluye en un año acabado en 0” (1991 a 2020 a la fecha de redacción de este documento) (OMM 2017), por lo que la información de “La Providencia” es de gran importancia para esto.

El segundo desafío es respecto al modelo de balance hídrico utilizado, que no representa precisamente la manera en que la reserva de agua fluctúa a lo largo de los días, pues no toma en cuenta el efecto que las características de cada suelo distinto tienen sobre el proceso de recarga y agotamiento hídrico. El tercer desafío es respecto al conocimiento de la capacidad de almacenamiento de los distintos suelos de El Salvador; pues esta es una característica que requiere de un conocimiento profundo de cada sitio de interés. El valor utilizado de 100 mm es una propuesta hecha por Thornthwaite (1948) que funciona como un promedio recomendado; mas no es verdaderamente aplicable a todos los suelos, puesto que éste es

un valor que varía según las características de cada localidad, según sea el uso del terreno y los intereses de los usuarios.

Para que la DOA pueda contar con la información climatológica proveniente de la estación “La Providencia”, fue necesario realizar el vaciado de los datos contenidos en las libretas meteorológicas a un formato digital a disponibilidad de la DOA, para, así, poder ellos consultarlos con facilidad y utilizarlos para sus estudios y hacer estimaciones más precisas en la zona de influencia de dicha estación agroclimatológica.

Para mejorar la precisión en cuanto al modelaje del comportamiento del agua en el suelo, fue necesario buscar nuevos métodos más actualizados, que tomasen en cuenta la influencia que las características del suelo tienen sobre este proceso, siendo especialmente necesario tener certeza de la tasa de desecación del suelo.

Para el conocimiento de la capacidad de almacenamiento de los distintos suelos del país, se requirió realizar un levantamiento de información en distintos sitios clave, para estudiar a profundidad las características físicas del perfil y del paisaje, a través de métodos de campo y de laboratorio, para poder determinar su lámina útil y, así, prescindir de la utilización de valores promedio poco representativos, que pudiesen derivar en una subestimación de la gravedad de las posibles situaciones de sequía meteorológica que se presenten en el futuro.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. el balance hídrico

Según Thornthwaite & Mather (1957), el término “balance hídrico” hace referencia la variación entre los ingresos y egresos de agua en el suelo, en forma de precipitación y evapotranspiración respectivamente. Schosinsky (2006) coincide en este planteamiento al mencionar que el balance hídrico se basa en el principio de conservación de la masa, dado que el agua que entra al suelo es igual al agua que se almacena en éste, más la que sale de él. Schosinsky considera que las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo (siendo ésta distinta a la precipitación, tomando en cuenta que no toda el agua precipitada se infiltra) y las salidas son debidas a la evapotranspiración y la percolación.

El agua, en la naturaleza, se mueve según una secuencia de procesos físicos que constituyen el “ciclo hidrológico”. Éste se define como el conjunto de transferencias de agua entre la atmósfera, el mar y la tierra en sus tres estados (sólida, líquida y gaseosa). El motor energético de estas transferencias es el Sol y los procesos básicos que incluye este ciclo son los de evapotranspiración, precipitación, infiltración, percolación y esorrentía (Aguiló Alonso et al. 2014).

El balance hídrico resulta ser un balance climático, dado que depende de factores de carácter meteorológico. A través de una comparación entre las marchas anuales de la precipitación y la evapotranspiración en un periodo temporal determinado, así como con otros parámetros de humedad relacionados, pueden determinarse el almacenamiento de agua edáfica, su escurrimiento, el déficit de humedad y el exceso (Thornthwaite & Mather 1957).

Un balance hídrico puede referirse a un determinado perfil de suelo o a toda una cuenca hidrográfica. Las cuencas hidrográficas son territorios cuya particularidad radica en que no reciben, en régimen natural (intervención antrópica nula), transferencias superficiales; y las que recibe de forma subterránea suelen ser generalmente poco importantes (Aguiló Alonso et al 2014).

5.2. principios de los balances hídricos

5.2.1. la precipitación. La precipitación se considera como la primera variable hidrológica y es la entrada natural de agua dentro del balance hídrico de los agroecosistemas y las cuencas. Se le puede llamar precipitación a la caída del agua de las nubes, ya sea en estado sólido o en estado líquido (Goyal y Ramírez Builes s.f.).

Según Castañeda, citado por Goyal y Ramírez Builes (s.f.), por precipitación se entiende el agua proveniente del vapor de agua atmosférico y que ha sufrido un proceso de condensación, depositándose, bajo cualquiera de sus formas, sobre la superficie de la tierra. La precipitación se puede clasificar en formas sólidas y líquidas; siendo sus formas líquidas la lluvia y la llovizna, las cuales se diferencian por el tamaño de las gotas.

La precipitación, por lo regular, se mide en períodos de 24 horas (entre las 7 a.m. del día anterior y las 7 a.m. del día de medición), utilizando pluviómetros, de los cuales existen diversos tipos. Su cuantificación se hace en “milímetros (mm)”, o sea, litros de agua recolectados por metro cuadrado de superficie. Se menciona existe la costumbre de medirse en pulgadas; sin embargo, esta práctica se considera anticuada y no recomendable (Lessmann 1978).

5.2.2. la evapotranspiración. La evaporación puede entenderse como el proceso por el cual el agua pasa de la fase líquida a la gaseosa; y ésta, en combinación con la transpiración vegetal, se denomina "evapotranspiración"; y si se cuenta con un suministro ilimitado de agua, puede conocerse como “evapotranspiración potencial” (Salazar Morales 1985).

La **evaporación** es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor de lagos, ríos, caminos, suelos o la vegetación mojada). Para cambiar el estado del agua de líquido a vapor, se requiere energía, la cual es proporcionada por la radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire. La humedad atmosférica y la velocidad del viento son también otros parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación (FAO 2006).

Cuando la superficie evaporante es el suelo, el grado de cobertura de éste por parte del cultivo, así como la cantidad de agua disponible en el perfil son otros factores que afectan el proceso de la evaporación. En zonas en las que el clima y el suelo son capaces de proveer agua con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda atmosférica, este proceso está determinado solamente por las condiciones meteorológicas; pero, en casos en que el intervalo entre la lluvia y el riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, el contenido en agua en los horizontes superiores disminuye y la superficie del suelo se seca. Ya en ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua, la evaporación acaba disminuyendo rápidamente y puede cesar casi en su totalidad en un corto lapso de tiempo (FAO 2006).

La **transpiración** consiste en la vaporización del agua líquida absorbida por las plantas y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Casi toda el agua extraída del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. Tanto la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y su capacidad de conducirla a las raíces también determinan la tasa de transpiración. Ésta también es influenciada por las características de la especie cultivada, su estado de desarrollo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo (FAO 2006).

El proceso para conocer la evapotranspiración es uno complejo, pues involucra condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas. Esta situación hace que su medición sea laboriosa (Salazar Morales 1985).

Existen dos métodos para su cuantificación:

- a) Instrumental, por medio de lisímetros.
- b) Por fórmulas matemáticas (físicas y empíricas) (Salazar Morales 1985).

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua o lámina húmeda. La unidad de tiempo puede ser una hora, un día, 10 días, un mes o incluso un completo período de cultivo o un año (FAO 2006). Como una hectárea (ha) tiene una superficie de $10,000 \text{ m}^2$ y 1 mm es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m^3 de agua por ha. Es decir $1 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ es equivalente $10 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ (FAO 2006).

El concepto de evapotranspiración puede definirse de diferentes formas; entre estas, la evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia (ETp o ETo respectivamente) y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc). La ETp es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera; en cambio, ETc se refiere a la evapotranspiración en condiciones presentes en parcelas de cultivo con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción, de acuerdo a las condiciones climáticas (FAO 2006).

Existe una relación ETc/ETp que puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos; y es conocida como el “coeficiente del cultivo (Kc)”, que se utiliza para relacionar la ETc a la ETp. Debido a variaciones en las características del cultivo durante sus diferentes periodos de crecimiento, el Kc cambia desde la siembra hasta la cosecha (FAO 2006).

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de la ETp; por lo que, mientras ésta representa un indicador de la demanda climática, el valor de Kc varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas; siendo este hecho la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de los valores de Kc ya desarrollados (FAO 2006).

El valor de Kc permite predecir el valor de ETc bajo condiciones estándar. Este valor representa el límite máximo de evapotranspiración del cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento del mismo debido a limitaciones de agua, densidad del cultivo, enfermedades, malezas, insectos o excesiva salinidad (FAO 2006).

El método FAO Penman-Monteith es recomendado como el único método de determinación de ETp con parámetros climáticos. Éste ha sido seleccionado debido a que logra aproximarse bastante a la ETp de cualquier localidad evaluada, dado que cuenta con bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (FAO 2006).

En El Salvador existe una limitante importante con respecto a las recomendaciones de la FAO. En las estaciones climatológicas del país ya no se obtienen varios de los datos requeridos para el cálculo de la ETp a través del método Penman-Monteith, debido a que no se encuentran dotadas de los equipos necesarios para ello*.

Sin embargo, a pesar de que es posible calcular los factores faltantes y obtener resultados satisfactorios, Salazar Morales (1985) y Escamilla (2021) coinciden en recomendar el uso de la fórmula de Hargreaves, dado que, con ella, se obtienen valores bastante cercanos a los obtenidos por el método propuesto por FAO, a pesar de utilizar una menor cantidad de datos; siendo ésta una alternativa bastante factible en nuestro territorio.

5.2.3. tipos de humedad y estados de humedad del suelo. Tradicionalmente se han distinguido los siguientes tipos de humedad en el suelo:

- **Humedad gravitacional:** Es el agua que ocupa los macroporos del suelo y que drena por la fuerza de la gravedad, mientras ésta sea mayor que la fuerza de retención del suelo, lo que está determinado por el diámetro de los poros.

* Galdámez, N. 29 feb. 2024. Disponibilidad de información climática para el uso del método Penman-Monteith (entrevista). San Salvador, El Salvador, MARN.

- **Humedad capilar:** Es agua retenida en poros de pequeño tamaño por fuerzas de capilaridad. El agua de los poros capilares puede percolar sólo muy lentamente a través del suelo y se admite que no puede drenar fuera del perfil edáfico. Los poros capilares son similares a tubos de pequeño diámetro en los que el agua tiende a desplazarse por succión, siendo ésta mayor conforme menor sea el diámetro de dichos poros.
- **Humedad higroscópica:** Es agua inmóvil, sólo removida por calentamiento del suelo (a 105 °C) o sequía prolongada; fuertemente retenida por fuerzas electroquímicas de adhesión a las partículas coloidales. Esta es agua que permanece cuando los poros del suelo se secan al aire (Aguiló Alonso et al. 2014 y Silva et al. 2015).

Es posible también clasificar el agua del suelo en “**humedad disponible y humedad no disponible para las plantas**”. El agua del suelo no disponible para las plantas está constituida por el agua gravitacional (ya que drena demasiado rápido), el agua higroscópica y por una parte de la humedad capilar que se encuentra retenida con demasiada fuerza y no puede ser superada por la fuerza de absorción de las raíces de las plantas. En cambio, el agua disponible para las plantas constituye únicamente el “*agua capilar absorbible*”, admitiéndose generalmente que es el agua retenida en poros capilares entre 0.00002 y 0.005 mm de diámetro, configurados por partículas entre 0.001 y 0.050 mm de diámetro, es decir, partículas de limo en su gran mayoría (Aguiló Alonso et al. 2014).

Cuando los poros del suelo están completamente llenos de agua, se dice que se encuentra en un estado de “ **saturación**”. La humedad, en este estado, se encuentra a 0 kPa de tensión (Avidán 1994). Cuando se ha perdido únicamente el agua gravitacional, se encuentra con un grado de humedad que define su “**capacidad de campo (CC)**”, marcando el límite entre el agua gravitacional y el agua capilar. En este punto, el agua se encuentra retenida en el suelo con una tensión de 33 kPa (0.33 bares). Luego, el límite entre el agua capilar y el agua higroscópica se expresa por el “*coeficiente higroscópico del suelo*”, que viene dado por la cantidad de agua retenida en el suelo con una tensión de 3,000 kPa (30 bares) (Aguiló Alonso et al. 2014).

El estado de humedad que define el umbral entre la humedad capilar absorbible por las plantas y la humedad capilar no absorbible es denominado como “**punto de marchitez permanente (PMP)**” y se observa cuando el agua se encuentra retenida con una tensión de 1,500 kPa (15 bares) (Aguiló Alonso et al. 2014).

Podemos denominar a la CC y el PMP como los “límites de la humedad disponible o del agua útil para la planta en el suelo”; pues, fuera de dichos umbrales, se acepta que la humedad no es accesible para su absorción por las raíces.

Para facilitar el entendimiento de cómo estos conceptos se manifiestan en el suelo, se ha elaborado un esquema (Figura 2) que ilustra los tipos de humedad y estados de humedad, según el agua va llenando la reserva del perfil.

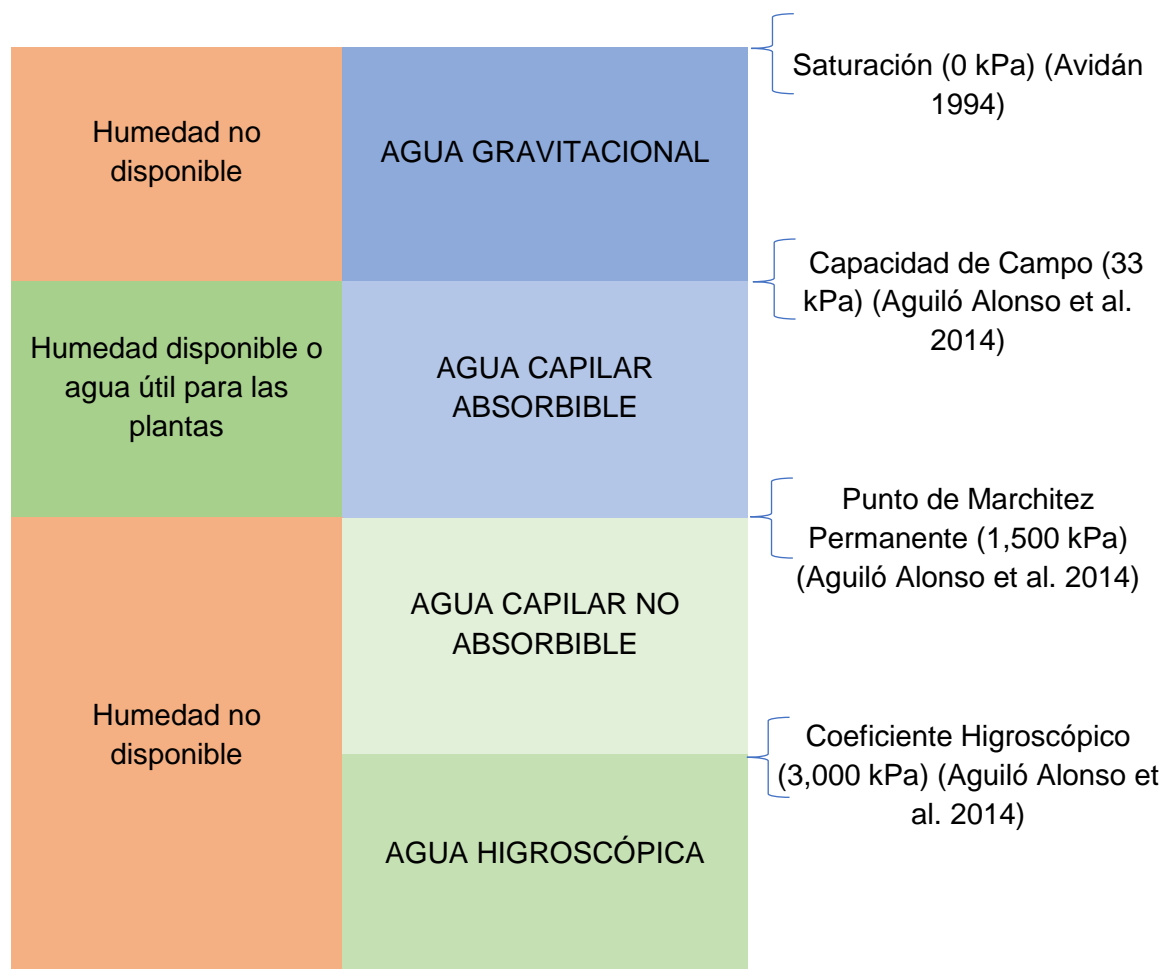


Figura 2. Tipos de agua, estados de humedad y disponibilidad de agua en el suelo

La CC indica la máxima cantidad de agua que puede retenerse en un volumen dado de suelo, sin que ésta drene hacia horizontes más profundos. La PMP indica el punto a partir del cual las plantas comienzan a sufrir deshidratación por la inaccesibilidad del agua para las raíces y ya no son capaces de recobrar su turgencia. Estos límites suelen expresarse en contenido gravimétrico de humedad en el suelo (%_w); sin

embargo, también es posible expresarlos en términos volumétricos (%_v) y de lámina húmeda (mm) (Aguiló Alonso et al. 2014 y Silva et al. 2015).

Como se observa en el Cuadro 3, el contenido de agua a CC y a PMP varía según la textura del suelo, siendo mayor en suelos con textura arcillosa y menor en suelos con textura arenosa.

Cuadro 3. Contenido de agua a CC y PMP en distintas clases texturales en porcentaje gravimétrico, según distintos autores

Clase textural	Según Santa Olalla y Valero		Según Avidán	
	CC (%w)	PMP (%w)	CC (%w)	PMP (%w)
Arcilla	23 – 46	13 – 29	31 – 39	15 – 19
Arcilloso arenoso			27 – 35	13 – 17
Franco arcillosa	18 – 23	9 – 10	23 – 31	11 – 15
Franca	12 – 18	4 – 11	18 – 26	8 – 12
Franco arenosa	8 – 13	4 – 6	10 – 18	4 – 8
Arena	5 – 7	1 – 3	6 – 12	2 – 6

Fuente: adaptado de Avidán 1994 y Santa Olalla y Valero, citados por Silva et al. 2015.

5.2.4. profundidad del suelo y profundidad efectiva. La profundidad del suelo se expresa por el espesor en centímetros del suelo hasta el lecho de roca o, en unos casos, hasta el estrato u horizonte cementado. De esta característica depende, en gran medida, el desarrollo radical y el volumen de agua disponible para la vegetación (Marsh, citado por Aguiló Alonso et al. 2014).

Se considera “profundidad efectiva” a aquella hasta la cual pueden desarrollarse las raíces, siempre y cuando el agua no sea un factor limitante (Porta et al., citado por Aguiló Alonso et al. 2014).

Cultivos de enraizamiento somero tienen muy poca agua disponible debido a que tienen acceso a una porción muy pequeña del suelo; pero, conforme la profundidad de enraizamiento va aumentando, las plantas van alcanzando una mayor porción del suelo y, por lo tanto, un mayor volumen de agua también (Thorntwaite & Mather 1957).

Un factor que complica la relación entre una planta y su profundidad de enraizamiento es el hecho de que una misma especie vegetal envía sus raíces a distintas profundidades, dependiendo del tipo de suelo en el que se encuentre; siendo así que las plantas tienden a enraizar a mayores profundidades en suelos arenosos que en suelos limosos o arcillosos. Este hábito de enraizamiento acaba por compensar, en cierta medida, el acceso a humedad que la capacidad de almacenamiento de estos suelos permite (Thorntwaite & Mather 1957).

5.2.5. Infiltración. Al proceso de entrada de agua en el suelo se le denomina “infiltración”. La tasa o velocidad de infiltración de un suelo se define como el flujo de agua que entra en el perfil del suelo por unidad de superficie (caudal de agua que ingresa a una superficie dada de suelo) (Aguiló Alonso et al. 2014).

La infiltración es una propiedad hidrodinámica que considera el movimiento vertical del agua en el suelo, estrechamente relacionada con los procesos de capilaridad y de las fuerzas asociadas con la adhesión y la cohesión de las partículas del suelo (Orjuela-Matta, citado por Villavicencio Poblete 2020). Ésta depende de la permeabilidad del suelo, de su conductividad hidráulica, del contenido de agua en el suelo, de la aportación de agua (intensidad de la lluvia o de riego), su pendiente y de la cubierta vegetal (Avidán 1994, Aguiló Alonso et al. 2014).

La permeabilidad de un suelo es su capacidad para dejar fluir agua o aire a través de su espesor. Ésta es una cualidad intrínseca del suelo y depende de su textura, estructura, grado de compactación, contenido en materia orgánica, porosidad, etc.; características que determinan el tamaño de los poros y su capilaridad. Muchas veces se considera un sinónimo de conductividad hidráulica (K), que se define como la velocidad de paso de agua a través de una unidad de sección transversal de suelo en una unidad de tiempo (flujo de agua) por cada unidad del gradiente hidráulico. Cuando el suelo está saturado, la conductividad se denomina conductividad hidráulica saturada (Ks) (Aguiló Alonso et al. 2014).

Se pueden identificar dos fuerzas que actúan en el proceso de infiltración. Al principio, dominan las fuerzas de succión del suelo, que dependen de su contenido de humedad; y la fuerza de gravedad, que actúa progresivamente con el transcurrir del tiempo. Al comienzo del proceso de infiltración, su valor es alto; pero con una marcada tendencia a decrecer en función del tiempo, hasta hacerse casi constante. En suelos secos, el agua presenta una velocidad de infiltración mayor que en un suelo húmedo. Conforme el suelo se va saturando, el gradiente de succión en la parte alta del perfil decrece hasta llegar a ser despreciable; con lo cual, la gravedad es la única fuerza que permite el movimiento de agua en la parte más superficial del perfil. A este valor constante de infiltración que se alcanza cuando el suelo está saturado se le denomina “infiltración base” (Avidán 1994).

Existen varios métodos para medir la velocidad de infiltración del agua al suelo; sin embargo, Avidán (1994) considera que el método de los “anillos infiltrómetros” es el predilecto al momento de definir esta propiedad para un suelo en particular. Según el instructivo elaborado por el Programa de Servicios Agrícolas Provinciales de Argentina (PROSAP s.f.), este método consiste en saturar una porción de suelo

limitada por dos anillos concéntricos para, a continuación, medir la variación del nivel de la reserva de agua contenida en el cilindro interior. Esta medición se hace a intervalos de 5 a 10 minutos (aunque pueden ser menores o mayores, según se considere necesario). Para la realización de esta prueba, se requiere, por lo general, entre 2 y 4 horas; al término de las cuales, se llega a una velocidad de infiltración constante que ya podemos considerar como la infiltración base (Avidán 1994). El criterio que nos permite determinar el momento en que la infiltración ha alcanzado un valor constante es cuando la diferencia entre dos mediciones sucesivas es menor del 10% (Villavicencio Poblete 2020).

De acuerdo a los datos registrados, se calculan los valores de la velocidad de infiltración en cada intervalo y luego se grafican los resultados. Cada suelo tiene una curva característica de infiltración, la cual depende de su textura, estructura y su contenido de humedad (Avidán 1994).

Debido a la influencia que las características del suelo tienen sobre la velocidad de infiltración y la naturaleza altamente variable de éste en el tiempo y el espacio, el valor de infiltración base es muy específico de cada localidad y solamente sería posible conocerlo a través de estudios de campo individuales. Sin embargo, es posible trabajar con valores promedio estimados en caso no sea accesible una prueba de infiltración. Avidán (1994) relaciona distintas texturas de suelo con rangos y valores promedio de infiltración base.

Cuadro 4. Velocidad de infiltración base según la textura del suelo

Textura del suelo	Velocidad de infiltración básica (cm/h)
Arenosa	5 (2.5 – 25)
Franco arenosa	2.5 (1.3 – 7.6)
Franca	1.4 (0.8 – 2)
Franco arcillosa	0.85 (0.25 – 1.5)
Arcilloso arenosa	0.4 (0.3 – 0.5)
Arcillosa	0.05 (0.01 – 0.1)

Fuente: adaptado de Avidán 1994.

Otro método disponible y que se rige por principios similares al de los anillos infiltrómetros es el del permeámetro de Guelph. Este es un instrumento el cual deposita agua en un agujero cilíndrico de

dimensiones conocidas, abierto en el suelo y dentro del cual se mantiene un nivel de líquido constante. Esto lleva a la formación de un bulbo de suelo saturado alrededor del agujero, cuya forma depende del tipo de suelo en cuestión. Cuando éste alcanza su “forma final” o se estabiliza, es posible determinar la conductividad hidráulica saturada (K_s) anteriormente mencionada (Soilmoisture Equipment Corporation 2008).

Así como con los anillos infiltrómetros, el permeámetro de Guelph cuenta con una reserva interna de agua en la cual se miden los cambios de nivel en intervalos de 2 minutos (pudiendo ser menores o mayores según necesidad). La prueba se detiene cuando tres valores consecutivos no muestren diferencias significativas entre sí (Soilmoisture Equipment Corporation 2008).

Schoeneberger et al. (2012) exponen una clasificación de suelos según su conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), desarrollada por el Soil Survey Staff del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en 1993.

Cuadro 5. Clasificación de suelos según conductividad hidráulica saturada (K_{sat})

Clases de K_{sat}	cm/h
Muy bajo	< 0.0036
Bajo	0.0036 a < 0.036
Moderadamente bajo	0.036 a < 0.36
Moderadamente alto	0.36 a < 3.6
Alto	3.6 a < 36
Muy alto	≥ 36

Fuente: adaptado de Schoeneberger et al. 2012.

5.3. modelos de balance hídrico

5.3.1. modelo de schosinsky (2006). El balance hídrico de Schosinsky (2006) fue desarrollado con el propósito de estimar recargas potenciales de aguas subterráneas para evitar su sobreexplotación. Dicho de otra forma, busca estimar la humedad que queda disponible para percolación.

Para su ejecución, primero es necesario conocer la fracción de la precipitación que realmente llega a infiltrarse en el suelo. Según Schosinsky & Losilla (1999), una parte de la precipitación es interceptada por el follaje y nunca llega a entrar en contacto con el suelo. Para conocer la infiltración, es necesario tomar en cuenta este dato. Luego, se determina la influencia que la pendiente, la cobertura y la textura del suelo tienen sobre la infiltración, una vez la precipitación llega a su superficie. Es hasta este momento que

entonces podemos realizar el balance hídrico para finalmente estimar el agua que estará disponible para drenaje.

Schosinsky toma en consideración la influencia que el contenido de agua en el suelo tiene sobre la evapotranspiración real (conforme la lámina húmeda se agota, más difícil se vuelve su desecación), a través de un modelo basado en lo que denomina el “coeficiente de humedad” (Ch), el cual utiliza para operar sobre la ETp y obtener la “evapotranspiración potencial real (ETpr)”. Este valor representa la evapotranspiración que sería posible según el estado del suelo y la humedad disponible en éste:

Ecuación 1. Fórmula simplificada del coeficiente de humedad, Schosinsky (2006)

$$Ch = \frac{(ST - PMP)}{(CC - PMP)}$$

Luego:

Ecuación 2. Fórmula simplificada de la evapotranspiración potencial real, Schosinsky (2006)

$$ETpr = Ch \times ETp$$

Sin embargo, para alcanzar un valor más certero, se toman en cuenta ciertas consideraciones para la obtención de Ch, las cuales se mencionan posteriormente.

El “Ch” de Schosinsky se limita a estimar fluctuaciones en la lámina húmeda útil. El divisor de la fórmula utilizada para su cálculo (que representa la lámina máxima que el suelo puede almacenar) es determinado a través de la diferencia entre CC y PMP.

El balance hídrico de Schosinsky es utilizado para hacer determinaciones mensuales que concluyen en un valor de recarga anual de aguas subterráneas; sin embargo, es posible adaptarlo a un período diario.

5.3.2. modelo de Thornthwaite & Mather (1955). El modelo de Thornthwaite & Mather (1955) fue desarrollado a partir de la revisión de un modelo previamente realizado por Thornthwaite (1948) (actualmente utilizado por la DOA). Éste se basa en un proceso de contabilidad que estima el balance entre los ingresos de humedad, en forma de precipitación y deshielo (en aquellos lugares que cuentan con glaciares); y los egresos, en forma de evapotranspiración, escorrentía y percolación (Alley 1984).

Alley (1984) aclara que este modelo está basado en la premisa que el suelo cuenta con una capacidad de almacenamiento de humedad dada (CC, capacidad de campo). Una variable de estado “ST_i” representa la

humedad del suelo almacenada al final del mes “i” y, según sea la diferencia entre los valores de precipitación (P_i) y evapotranspiración (ETp_i), se añade o sustrae humedad a la cantidad ya presente en el suelo. En el caso que $P_i > ETp_i$ (lo que denominaríamos un “período húmedo”), la humedad edáfica se comporta según un modelo directo:

Ecuación 3. Modelo directo de reabastecimiento de lámina, según Thornthwaite & Mather (1955)

$$ST_i = \min\{(P_i - ETp_i) + ST_{i-1}, CC\}$$

En cambio, en el caso que $P_i < ETp_i$ (período seco), el comportamiento se describe según un modelo exponencial:

Ecuación 4. Modelo exponencial de agotamiento de lámina, según Thornthwaite & Mather (1955)

$$ST_i = ST_{i-1} \times \exp[-(-ETp_i - P_i)/CC]$$

El cambio de modelo de comportamiento de uno directo a uno exponencial es debido a que, como lo reconocen Thornthwaite & Mather (1955), conforme el suelo va perdiendo humedad, la tasa a la que ésta es extraída se vuelve cada vez menor en comparación a la pérdida potencial de agua ($P_i - ETp_i$). Dicho de otra forma, conforme el suelo va perdiendo su humedad, la que aún conserva es retenida con mayor fuerza, dificultando cada vez más su pérdida por evapotranspiración; lo que lleva a que exista una diferencia entre la evapotranspiración potencial y la humedad que evapora realmente, la **evapotranspiración real** (ETr).

Aunque suele trabajarse el balance hídrico a escala mensual, también es posible ejecutarlo diariamente. Thornthwaite & Mather (1955, 1957) demuestran que los mismos modelos aplicados para balances hídricos mensuales funcionan también para balances a una escala temporal diaria.

5.3.2.1. modelo de Thornthwaite & Mather, modificado por Fernández Long et al. (2012). Según lo exponen Fernández Long et al. (2012, 2019), el modelo exponencial de Thornthwaite & Mather (1955) cuenta con una limitante bastante importante respecto a la estimación real del comportamiento de la humedad en el suelo; esto es que se asume que todos los tipos de suelo pueden acabar agotando sus reservas de agua por completo, llegando a 0 mm absolutos almacenados. Considerando la existencia de agua higroscópica y de agua capilar fuertemente retenida (ambas no disponibles para su extracción por las raíces de las plantas o la atmósfera), existe cierto contenido de humedad que, en muchos casos, nunca sale del perfil edáfico bajo condiciones naturales, según las características del suelo. Basándose en la anteriormente mencionada observación, se introduce una

modificación (inérita para su momento), desarrollada por Forte Lay (colaborador en dicho trabajo), que impide el desecamiento excesivo estimado por el modelo original de Thornthwaite & Mather, estableciendo un umbral o límite de desecamiento que existe en aquellos suelos cuyo PMP es mayor al 40% de la CC, o sea, suelos de textura franca a arcillosa; mientras que, suelos con un PMP igual o menor al 40%, que cuentan con una fracción gruesa más predominante, sí podrían llegar a secarse completamente.

Esta modificación al modelo exponencial se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 5. Modelo exponencial de agotamiento de lámina, modificado por Fernpandez Long et al. (2012)

$$ST_i = ST_{i-1} \times \exp[-(-ETp_i - P_i)/CCD]$$

Donde CCD significa “capacidad de campo disponible”:

5.3.2.2. modelo de Thornthwaite & Mather, modificado Botey et al. (2011). Botey et al. (2011) presentan otra modificación al modelo de Thornthwaite & Mather (1955), en la cual establecen la existencia de una “reserva máxima” (Rmáx) consistente en el contenido de humedad por encima de PMP y por debajo de CC, conocido también como “agua disponible total” (ADT). Se presenta de la siguiente forma:

Ecuación 6. Modelo exponencial de agotamiento de lámina, modificado por Botey et al. (2011)

$$ST_i = ST_{i-1} \times \exp[-(-PE_i - P_i)/Rmáx]$$

Bajo este modelo, el agotamiento de humedad tiene un condicionamiento similar al que establece Forte Lay con su ELD; con la diferencia que, en éste, el PMP es considerado el umbral de desecamiento. El contenido de humedad fluctuante se encuentra entre CC y PMP; o sea, únicamente la lámina de agua útil es la que puede llegar a agotarse. Por debajo de PMP, el contenido de humedad es fijo y no podría llegar a secarse bajo condiciones naturales.

Este modelo modificado es utilizado por la Agencia Estatal de Meteorología del Reino de España (AEMET) (Botey et al. 2015).

6. METODOLOGÍA

6.1. metodología de campo

6.1.1. levantamiento de información de campo en estudio de suelos. Para llevar a cabo el levantamiento de información de suelos, se acompañó a un equipo de profesionales a 10 de 25 sitios que se encontraban dentro un radio de 15 km de las distintas estaciones climatológicas en todo el país, seleccionados según criterio de técnicos del MARN. En cada sitio, se efectuaron dos estudios simultáneos, uno edafológico y otro hidrológico, para lo cual, el equipo se subdividió con el propósito de trabajar más eficientemente.

Para el estudio edafológico, se tomó, como base metodológica, el “Manual para la Descripción de Perfiles de Suelos” (Gutiérrez Castorena 2023) y se utilizó el formato de recolección que en dicho documento se encuentra (Ver Anexo 1). La selección del punto y el muestreo de suelo para su análisis en laboratorio se hizo según la metodología descrita en la hoja divulgadora “Toma de Muestras de Tierra” (Tamés 1950) y en la “Guía para la Descripción de Suelos” (FAO 2009); realizando modificaciones metodológicas según criterio.

Para el estudio hidrológico, se tomaron, como base, el documento “Determinación de la Conductividad Hidráulica en la Zona No Saturada con el Permeámetro de Guelph” (Valdés y Cox 2006), el manual titulado “Instrucciones de Operación del Permeámetro de Guelph 2800K1” (Soilmoisture Equipment Corporation 2008) y el extracto “Metodología para Determinar la Velocidad de Infiltración en Suelos al Establecimiento” (Villavicencio Poblete 2020).

- **Descripción de las características del sitio**

Para el estudio de las características del sitio, se determinaron las siguientes variables: el estado del tiempo meteorológico, su provincia fisiográfica, su elevación, pendiente, posición del perfil en la ladera, orientación del perfil, la vegetación presente, el uso y cubierta del suelo, tipo de drenaje, propensión a inundaciones y encharcamiento, humedad del suelo al momento del levantamiento, el material parental del suelo, grado y tipo de erosión y su pedregosidad. Para la medición de pendiente y determinación de su dirección, se hizo uso de una brújula Brunton; y las otras variables se determinaron por observación, contrastando con parámetros del “Manual para la Descripción de Perfiles de Suelos”.

- **Estudio de la morfología del suelo**

Para el estudio de la morfología del suelo, se realizó una calicata de dimensiones planas aproximadas a 1m x 1m y una profundidad variable (máxima de 1 m), según el desarrollo del suelo (identificado según criterio del especialista en suelos) y la posibilidad en el sitio para descubrir el perfil. Se hizo una descripción *in situ* de las características físicas por medio de observación, manipulación y extracción de terrones para su comparación de color, siendo éste el proceso necesario para la identificación de las distintas capas del suelo. Se dibujaron diagramas del perfil y se hizo la designación de horizontes, el tipo de límite entre estos, su textura y estructura, la presencia de poros, grietas, raíces y rasgos especiales (revestimientos, nódulos y motas); auxiliándose de los parámetros presentados en el “Manual para la Descripción de Perfiles de Suelos”. Para la identificación de rasgos, se utilizó una lupa de geólogo.

Una vez identificado cada horizonte, se procedió a la extracción de muestras. Para el estudio de la densidad aparente, se utilizó un cilindro de Uhland a cada 15 cm de profundidad. Luego, se tomó una muestra de 2 lb de suelo de cada horizonte identificado, para el posterior estudio de sus propiedades físicas en laboratorio. Todas las muestras se guardaron en su respectiva bolsa plástica y fueron rotuladas de manera correspondiente.

- **Estudio de la infiltración base y la conductividad hidráulica**

Para el estudio de la infiltración base y la conductividad hidráulica del suelo, se utilizaron el permeámetro de Guelph (modelo 2800K1) y el infiltrómetro de doble anillo de forma paralela. Para la realización de estas pruebas, se seleccionó un punto levemente alejado en los sitios para no interferir con el estudio edafológico; pero no demasiado como para que las propiedades del suelo fuesen muy distintas.

Para la toma de datos por el permeámetro de Guelph, se abrió un agujero de 5 cm de diámetro y 30 cm de profundidad (estándar para el estudio de la infiltración) con un conjunto de barrenos (equipos complementarios al permeámetro). En algunos casos, la prueba se realizó a 15 cm o a 60 cm, debido a que las características del suelo a 30 cm no permitían la obtención de lecturas. En otros casos, se llevaron a cabo dos pruebas, una a 30 cm y otra a 60 cm de profundidad, debido a la presencia de dos capas de suelo con propiedades distintas. Las lecturas se realizaron a un intervalo fijo de dos minutos.

Para la toma de datos con el infiltrómetro de doble anillo, se utilizó un intervalo de tiempo creciente, conforme el suelo se fue saturando y la infiltración se ralentizaba, con tal de permitir que el nivel del agua cambiase de forma perceptible y facilitase la lectura.

Para la recolección de datos de ambos procesos, se utilizaron sus formatos de campo respectivos, elaborados por los profesionales encargados del estudio (Anexo 2).

6.1.2. recuperación de libretas climatológicas de la estación agrometeorológica “La Providencia”. Se realizó una visita a las instalaciones de la estación agrometeorológica “La Providencia” para organizar todas las libretas climatológicas (aún resguardadas) según fecha, para luego ser transportadas a la Facultad de Ciencias Agronómicas para su respectivo vaciado. Debido a una entrevista previa con uno de los observadores meteorológicos que solían trabajar ahí, fue posible saber de antemano qué margen de tiempo abarcaban las observaciones realizadas durante el tiempo de operación de la estación.

6.2. metodología de gabinete

6.2.1. consolidación de la información de campo en una ficha de descripción de suelos.

Se elaboró una ficha descriptiva en formato digital para la consolidación de los datos levantados en campo y los obtenidos a través de las pruebas físicas de laboratorio, para cada sitio individual estudiado. Éste se hizo tomando elementos de otras fichas expuestas por el Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Granada, como lo muestra Dorronsoro Fernández (s.f.) en su museo virtual; y por Rico Naves (1974) para las descripciones de perfiles de suelos en su libro “Las Nuevas Clasificaciones y los Suelos de El Salvador”.

Se vació la información obtenida en campo y laboratorio dentro las fichas elaboradas, según ésta fue estando disponible después de cada estudio realizado (Ver Anexo 3).

Los resultados obtenidos de las pruebas de infiltración fueron recolectados de forma separada en cuadros resumen, según método utilizado (infiltrómetro de doble anillo y permeámetro de Guelph).

6.2.2. diseño de una propuesta de balance hídrico. Se trabajó en la elaboración de una nueva propuesta de balance hídrico que toma en cuenta las características específicas de cada sitio, según la información levantada en campo; siendo esto una mejora respecto al modelo de Thornthwaite (1948), utilizado actualmente por la DOA. Éste último se fundamenta en la siguiente fórmula:

Ecuación 7. Modelo de comportamiento de lámina húmeda de Thornthwaite (1948)

$$ST_i = (P_i - ETp_i) + ST_{i-1}$$

Donde:

- ST_i : Humedad almacenada del día actual (mm).
- ST_{i-1} : Humedad almacenada del día anterior (mm).

- P_i : Precipitación del día actual (mm).
- ET_{pi} : Evapotranspiración potencial del día actual (mm).

Para la elaboración de la nueva propuesta, se trabajó alrededor de los dos modelos previamente mencionados, el de Schosinsky (2006) y el de Thornthwaite & Mather (1955) según sus dos modificaciones. Estos fueron estudiados a fondo y se identificaron los componentes metodológicos que les conforman para luego combinarlos. A partir de este proceso, se desarrollaron seis propuestas, de las cuales, se escogió a criterio la que mejor se ajusta a las condiciones presentes en campo y a los propósitos de la DOA.

6.2.2.1. balance hídrico según Schosinsky (2006). El balance hídrico de Schosinsky (2006) se desarrolla según los siguientes pasos:

1. **Evapotranspiración potencial (ETp):** su determinación depende de variados procesos que requieren de instrumental, ajustes y cálculos matemáticos.
2. **Precipitación (P):** su valor se obtiene de mediciones a través de instrumental pluviométrico que, en su mayoría, se encuentra establecido en estaciones climáticas o pluviométricas a lo largo de un territorio.
3. **Retención de lluvia por el follaje (Ret):** es la fracción de la precipitación que queda atrapada y se evapora en el follaje de la cobertura vegetal, nunca llegando a entrar en contacto con el suelo. Según lo establecen Butler y Linsley et al. (citados por Schosinsky & Losilla 2000), la proporción de lluvia retenida suele ser del 12%; pero puede ser del 20% en bosques muy densos.

Ecuación 8. Retención foliar de la precipitación (Schosinsky & Losilla 2000)

$$Ret = P * Cfo$$

Donde Cfo es el “coeficiente de retención del follaje”, el cual es igual a 0.12 (12%) en casos generales o 0.2 (20%) para bosques muy densos.

4. **Infiltración pluvial o precipitación infiltrada (Pi):** Es la precipitación que alcanza a entrar en el perfil del suelo. Su valor es determinado por el “coeficiente de infiltración (Ci)”, el cual opera sobre la precipitación después de haberse sustraído la fracción retenida en el follaje. El Ci mismo resulta de la suma de tres índices, los cuales dependen de la textura del suelo (Kib), su pendiente (Kp) y el tipo de cobertura vegetal (Kv). El Ci , al ser un coeficiente, no puede ser menor a 0 o superior a 1. Schosinsky

& Losilla (1999) establecen que, si su cálculo resulta en un valor por fuera de esos límites establecidos, entonces C_i será igual a 0 o a 1 en sus casos respectivos.

Ecuación 9. Infiltración pluvial (Schosinsky & Losilla 2000)

$$P_i = C_i \times (P - Ret)$$

Entonces, para el cálculo de C_i :

Ecuación 10. Coeficiente de infiltración del suelo (Schosinsky & Losilla 2000)

$$C_i = K_{ib} + K_v + K_p$$

El K_{ib} o “coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo” se ve condicionado por la infiltración base en los primeros 30 cm de profundidad del suelo en cuestión (I_b). Esto, según lo considera Schosinsky (2006), es debido a que éste es el espesor de suelo que se encuentra en contacto directo con la lluvia. Según I_b sea menor a 16 mm/día, mayor a 1568 mm/día o su valor se encuentre entre estos dos umbrales, entonces:

Ecuación 11. Coeficiente de infiltración según la textura del suelo, Schosinsky & Losilla (2000)

$$\begin{array}{ll} \text{Si } I_b \leq 16 \text{ mm/día} & \rightarrow K_{ib} = 0.0148(I_b) \div 16 \\ \text{Si } 16 \text{ mm/día} < I_b \leq 1568 \text{ mm/día} & \rightarrow K_{ib} = 0.267 \ln(I_b) - 0.000154(I_b) - 0.723 \\ \text{Si } I_b > 1569 \text{ mm/día} & \rightarrow K_{ib} = 1 \end{array}$$

Luego, los valores de K_p y K_v se obtienen según los siguientes cuadros:

Cuadro 6. Coeficiente de infiltración según la pendiente del terreno

Descripción	Porcentaje de pendiente	K_p
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	>7%	0.06

Fuente: Tomado de Schosinsky (2006)

Cuadro 7. Coeficiente de infiltración según la cobertura vegetal

Cobertura vegetal	Kv
Cobertura con zacate <50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate >75%	0.21

Fuente: Tomado de Schosinsky (2006)

5. **Escorrentía superficial (Esc):** Es la humedad que no alcanza a ingresar al suelo y, en cambio, escurre sobre éste. Se obtiene restando la P_i a la precipitación a la que previamente se le ha sustraído la fracción retenida por el follaje.

Ecuación 12. Escorrentía superficial (Schosinsky & Losilla 2000)

$$Esc = (P - Ret) - P_i$$

6. **Humedad del suelo al inicio del día (ST_{i-1}):** Es la reserva húmeda con la que cuenta el suelo al inicio del día en cuestión. Su valor es igual a la humedad final del día anterior (ST_i).
7. **Coeficiente de humedad al final del día, antes de que ocurra la evapotranspiración (C_1):** Es el coeficiente de humedad que existiese en el caso hipotético que la evapotranspiración no ocurriese. Se obtiene considerando que la humedad del suelo es la suma entre la ST_{i-1} y la P_i del día de hoy. Podría considerarse a éste como el coeficiente de humedad máximo posible.

Ecuación 13. Coeficiente de humedad previo a la evapotranspiración (Schosinsky 2006)

$$C_1 = \frac{(ST_{i-1} + P_i - PMP)}{(CC - PMP)}$$

8. **Coeficiente de humedad al final del día, después que ocurre la evapotranspiración (C_2):** Es el coeficiente de humedad que existiría en el caso hipotético que la evapotranspiración ocurriese luego de haber tenido lugar la infiltración. Se obtiene incluyendo el valor de la “evapotranspiración potencial real, considerando la humedad correspondiente a C_1 (ET_{pr_1})” en la ecuación. Para la obtención de este término, se multiplica la ET_p por el C_1 . C_2 es el coeficiente de humedad mínimo y éste es el que más se aproxima al que existe al final del día.

Ecuación 14. Coeficiente de humedad posterior a la evapotranspiración (Schosinsky 2006)

$$C_2 = \frac{(ST_{i-1} + P_i - PMP - ET_{pr_1})}{(CC - PMP)}$$

Donde:

Ecuación 15. Evapotranspiración real tentativa para un suelo, previo a su desecación (Schosinsky2006)

$$ET_{pr_1} = C_1 \times ET_p$$

9. **Evapotranspiración potencial real o Evapotranspiración real tentativa (ETpr):** Es la ETp que ha sido operada con los dos coeficientes de humedad previamente calculados (C_1 y C_2). Como la evapotranspiración ocurre a lo largo del día, Schosinsky (2006) considera que la mejor aproximación a un valor real es promediando los coeficientes de humedad máximo y mínimo del día en cuestión.

Ecuación 16. Evapotranspiración potencial real (Schosinsky 2006)

$$ET_{pr} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right) ET_p$$

10. **Humedad disponible (HD):** Es la humedad que realmente está disponible para su evapotranspiración.

Ecuación 17. Humedad disponible (Schosinsky 2006)

$$HD = ST_{i-1} + P_i - PMP$$

11. **Evapotranspiración real (ETr):** Es la evapotranspiración que realmente ocurre en el día. Si la HD es menor que la ETpr, entonces el suelo no contará con la humedad suficiente para suplir la demanda atmosférica, por lo que ETr será igual a HD; sin embargo, si la HD es igual o mayor a la ETpr, entonces el suelo podrá evapotranspirar la humedad suficiente, por lo que ETr será igual a ETpr.

Ecuación 18. Evapotranspiración real según Schosinsky (2006)

$$\begin{aligned} \text{Si } HD < ET_{pr} &\rightarrow ETr = HD \\ \text{Si } HD \geq ET_{pr} &\rightarrow ETr = ET_{pr} \end{aligned}$$

12. **Humedad del suelo al final del día (ST_i):** Es la humedad que hay almacenada en el suelo al final del día, luego de haber ocurrido la infiltración y la evapotranspiración. Ésta no puede ser mayor a la capacidad de campo. Su valor se vuelve la humedad inicial del día siguiente.

Ecuación 19. Humedad del suelo al final del día (Schosinsky 2006)

$$ST_i = HD + PMP - ETr$$

$$\text{Si } ST_i > CC \rightarrow ST_i = CC$$

13. **Recarga potencial (R):** Es el agua excesiva que logra percolar y recargar los acuíferos. Es la humedad que queda luego que el suelo ha alcanzado su capacidad de campo y ha satisfecho la demanda atmosférica de vapor.

Ecuación 20. Recarga hídrica potencial (Schosinsky 2006)

$$R = P_i + ST_{i-1} - ST_i - ETr$$

Cuadro 8. Ficha hídrica según el balance hídrico diario de Schosinsky

Capacidad de campo de 270 mm. Punto de marchitez permanente de 121 mm. Contenido de humedad inicial de 260 mm. Infiltración base de 240 mm/día. Cobertura de terreno cultivado. Retención de humedad del 12%. Pendiente fuerte (Todos los valores en mm).

Fecha	ETp	P	Ret	P _i	Esc	ST _{i-1}	C ₁	C ₂	Etpr	HD	ETR	ST _i	R
May													
30	3	1	0.12	0.76	0.12	260	0.94	0.92	2.79	139.76	2.79	257.97	0
31	2	18	2.16	13.62	2.22	257.97	1	1	2	150.59	2	269.59	0
Jun													
1	2	11	1.32	8.32	1.36	269.59	1	1	2	156.91	2	270	5.91
2	2	1	0.12	0.76	0.12	270	1	1	2	149	2	268	0
3	3	0	0	0	0	268	1	0.97	2.96	147	2.96	265.04	0
4	3	0	0	0	0	265.04	0.97	0.95	2.88	144.04	2.88	262.16	0
5	5	0	0	0	0	262.16	0.95	0.92	4.7	141.16	4.7	257.46	0

Fuente: Adaptado de Thornthwaite & Mather 1957 y elaborado con base en valores levantados en campo.

6.2.2.2. balance hídrico según Thornthwaite & Mather (1955). El balance hídrico de Thornthwaite & Mather (1955), en su metodología original, se desarrolla según los siguientes pasos:

1. **Evapotranspiración potencial (ETp):** representa la transferencia de vapor hacia la atmósfera que sería posible bajo condiciones ideales de humedad edáfica y cobertura vegetal, siendo un valor que depende enteramente de las condiciones climáticas del sitio en cuestión (Thornthwaite 1948). Representa el principal egreso de humedad en el suelo. Según lo afirman Botey Fullat y Moreno García (2015), las condiciones ideales que asume Thornthwaite en su balance hídrico son las de un pastizal plano y bien drenado.
2. **Precipitación (P):** es el principal ingreso de agua para el suelo. Su valor se obtiene de mediciones a través de instrumental pluviométrico, en su mayoría, establecido en estaciones climáticas o pluviométricas a lo largo de un territorio.

3. **Pérdidas potenciales ($P - ETp$):** es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Si su valor es positivo, representa un incremento en el agua del suelo (día húmedo); en cambio, si resulta negativo, significa una sustracción potencial de humedad (día seco o árido). Condiciona bajo qué modelo se describirá el comportamiento de la humedad del suelo.
4. **Almacenamiento de humedad del suelo (ST):** es la lámina húmeda almacenada en un momento dado, la cual se obtiene a través de los modelos de comportamiento previamente mencionados (Ecuación 3 y 4), según se trate de un día húmedo o árido. Thornthwaite & Mather (1957) mencionan que, para poder calcular el almacenamiento de humedad, es necesario partir de un valor inicial de humedad almacenada ya conocido. Éste puede obtenerse a través de mediciones directas; sin embargo, si lo que se desea es investigar el almacenamiento de humedad para un período en el pasado, se debe asumir una lámina inicial igual a la capacidad de campo del suelo para un día posterior a la época lluviosa del año e iniciar el cálculo del balance, por lo menos, desde un año previo al período de interés del estudio; esto con el propósito de reducir el margen de error para las estimaciones de humedad para el período actual.

Si $P_i > ETp_i$, entonces entra en efecto la ecuación 3:

$$ST_i = \min\{(P_i - ETp_i) + ST_{i-1}, CC\}$$

Si $P_i < ETp_i$, entonces, se utiliza la ecuación 4:

$$ST_i = ST_{i-1} \times \exp[-(-ETp_i - P_i)/CC]$$

5. **Cambio de almacenamiento de humedad del suelo (ΔST):** es la diferencia entre el almacenamiento actual y el almacenamiento del día anterior. Refleja específicamente el incremento o reducción en el contenido de agua en el suelo. Este valor se vuelve cada vez más distinto a las pérdidas potenciales conforme el suelo va perdiendo humedad, debido a la retención de los poros y las partículas del suelo.

Ecuación 21. Cambio de almacenamiento de humedad (Thornthwaite & Mather 1955)

$$\Delta ST_i = ST_i - ST_{i-1}$$

6. **Evapotranspiración real (ETr):** es la transferencia de vapor hacia la atmósfera que realmente ocurre. Cuando las pérdidas potenciales son positivas ($P > ETp$), se logra suplir la demanda de la atmósfera por completo, por lo que $ETr = ETp$. En cambio, si las pérdidas potenciales son negativas ($P < ETp$), el valor

de ETr resulta de la suma de la precipitación que haya habido en el día en cuestión, más el agua que se haya podido sustraer de la humedad del suelo.

Ecuación 22. Evapotranspiración real según Thornthwaite & Mather (1955)

$$\text{Si } P_i > ETp_i \rightarrow ETr_i = ETp_i$$

$$\text{Si } P_i < ETp_i \rightarrow ETr_i = P_i + |-\Delta ST_i|$$

7. **Déficit de humedad:** representa la cantidad de agua que hizo falta para suplir la demanda de humedad de la atmósfera. Es un cálculo que solamente se efectúa cuando las pérdidas potenciales resultan negativas; y puede llevarse a cabo de dos maneras:

Ecuación 23. Déficit de humedad por diferencia entre la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial (Thornthwaite & Mather 1955)

$$D\acute{e}f_i = ETR_i - ETp_i$$

Ecuación 24. Déficit de humedad por diferencia entre las pérdidas potenciales y el cambio de almacenamiento (Thornthwaite & Mather 1955)

$$D\acute{e}f_i = (P_i - ETp_i) - (-\Delta ST_i)$$

8. **Exceso de humedad:** representa la precipitación que excede a la evapotranspiración potencial, luego de haber alcanzado el suelo su capacidad de campo.

Ecuación 25. Exceso de humedad en el suelo (Thornthwaite & Mather 1955)

$$Exc_i = (P_i - ETp_i) - \Delta ST_i$$

Cuadro 9. Balance hídrico diario de Thornthwaite & Mather, mayo-junio

Capacidad de campo de 270 mm. Punto de marchitez permanente de 121 mm. Contenido de humedad total inicial de 260 mm. (Todos los valores en mm).

Fecha	Etp _i	P _i	P-Etp	ST _i	ΔST	ETR	Déf	Exc
May				260				
30	3	1	-2	258.08	-1.92	2.92	-0.08	
31	2	18	16	270	11.92	2		4.08
Jun								
1	2	11	9	270	0	2		9
2	2	1	-1	269	-1	2	0	
3	3	0	-3	266.04	-2.96	2.96	-0.04	
4	3	0	-3	263.11	-2.93	2.93	-0.07	
5	5	0	-5	258.28	-4.83	4.83	-0.17	

Fuente: Adaptado de Thornthwaite & Mather 1957 y elaborado con base en valores levantados en campo.

- **modificación de Fernández Long et al. (2012).** La fórmula del modelo exponencial que proponen Fernández Long et al. (2012) (Ecuación 5) reemplazaría el utilizado por Thornthwaite & Mather (1955) en el paso 4 de la metodología anteriormente expuesta.

$$ST_i = ST_{i-1} \times \exp[-(-ETp_i - P_i)/CCD]$$

Donde CCD significa “capacidad de campo disponible”:

Ecuación 26. Capacidad de campo disponible (Fernández Long et al. 2012)

$$CCD = CC - ELD$$

“ELD” es el límite de desecamiento o el umbral debajo del cual el suelo no podrá secar más. Éste primero se determina de la siguiente manera:

Ecuación 27. Límite de desecamiento (Fernández Long et al. 2012)

$$LD = \left(\frac{PMP}{CC} - 0.4 \right) \times 2.5$$

Luego:

$$si \begin{cases} LD < 0 & \rightarrow LD' = 0 \\ 0 \leq LD \leq 1 & \rightarrow LD' = LD \\ LD > 1 & \rightarrow LD' = 1 \end{cases}$$

Entonces:

$$ELD = LD' \times PMP$$

Previo a la realización del balance hídrico, es necesario primero tener conocimiento de la CCD de nuestro suelo en cuestión, por lo que el cálculo de lo que de ahora en adelante denominaremos el “componente de Forte Lay” deberá de realizarse antes del paso uno de la metodología anteriormente expuesta.

Cuadro 10. Ficha hídrica según el balance hídrico diario de Thornthwaite & Mather, modificado por Fernández-Long et al.

Capacidad de campo de 270 mm. Punto de marchitez permanente de 121 mm. Capacidad de campo disponible de 255.48 mm Límite de desecación de 14.52 mm. Contenido de humedad total inicial de 260 mm. Lámina agotable de 245.48 mm Infiltración base de 240 mm/día. (Todos los valores en mm).

Fecha	Etp _i	P _i	P-Etp	ST _i	ΔST	ETR	Déf	Exc	Hum. Total*
May				245.48					
30	3	1	-2	243.55	-1.93	2.93	-0.07		258.07
31	2	18	16	255.48	11.93	2		4.07	270
Jun									
1	2	11	9	255.48	0	2		9	270
2	2	1	-1	254.48	-1	2	0		269
3	3	0	-3	251.51	-2.97	2.97	-0.03		266.03
4	3	0	-3	248.57	-2.94	2.94	-0.06		263.09
5	5	0	-5	243.75	-4.82	4.82	-0.18		258.27

Fuente: Adaptado de Thornthwaite & Mather 1957 y elaborado con base en valores levantados en campo.

* La humedad total consiste en la suma de la ST_i y la PMP.

- **modificación de Botey et al. (2012).** La fórmula exponencial propuesta por Botey et al. (2012) (Ecuación 6) también reemplazaría la propuesta por Thornthwaite & Mather (1955) en el paso 4 de la metodología anteriormente expuesta.

$$ST_i = ST_{i-1} \times \exp[-(-PE_i - P_i)/Rmáx]$$

Donde:

Ecuación 28. Reserva hídrica máxima del suelo (Botey et al. 2011)

$$R_{\text{máx}} = ADT = CC - PMP$$

La reserva máxima ($R_{\text{máx}}$) o agua disponible total (ADT) deberán de calcularse previamente al paso 1 del procedimiento ya expuesto.

Cuadro 11. Ficha hídrica según el balance hídrico diario de Thornthwaite & Mather, modificado por Botey et al.

Capacidad de campo de 270 mm. Punto de marchitez permanente de 121 mm. Reserva máxima de 149 mm. Contenido de humedad total inicial de 260 mm. Lámina agotable de 139 mm. Infiltración base de 240 mm/día. (Todos los valores en mm).

Fecha	Etp _i	P _i	P-Etp	ST _i	ΔST	ETR	Déf	Exc	Hum. Total
May				139					
30	3	1	-2	137.15	-1.85	2.85	-0.15		258.15
31	2	18	16	149	11.85	2		4.15	270
Jun									
1	2	11	9	149	0	2		9	270
2	2	1	-1	148	-1	2	0		269
3	3	0	-3	145.05	-2.95	2.95	-0.05		266.05
4	3	0	-3	142.16	-2.89	2.89	-0.11		263.16
5	5	0	-5	137.47	-4.69	4.69	-0.31		258.47

Fuente: Adaptado de Thornthwaite & Mather 1957 y elaborado con base en valores levantados en campo.

6.2.2.3. elaboración de seis propuestas de balance hídrico. Para la elaboración de las propuestas, fue necesario reconocer cada aspecto de los modelos base, sus particularidades y similitudes, con tal de separarlos en sus elementos básicos y, así, poder manejarlos según los propósitos establecidos.

Los elementos centrales de cada modelo son las fórmulas matemáticas que determinan la tasa de recarga hídrica y el consumo de agua en el perfil (los coeficientes de humedad de Schosinsky y los modelos directo y exponencial de Thornthwaite & Mather), según la cantidad total de lluvia en el día y la presencia o ausencia de lámina húmeda almacenada en el suelo. Estos procesos se ven complementados por otros

componentes que determinan algunas de las condiciones que también influyen en los resultados a obtener.

Como pudo observarse anteriormente, el modelo de Schosinsky inicia con la determinación de la fracción pluvial que infiltrará en el suelo; proceso que Thornthwaite & Mather (T&M) no lleva a cabo, utilizando, en su lugar, el valor de precipitación bruta, tal y como se obtiene de los datos recolectados o de las estimaciones climatológicas. Esto genera una diferencia en el ingreso de humedad estimado por cada modelo, siendo menor para Schosinsky que para T&M.

Luego están las diferencias en la capacidad de almacenamiento hídrico estimada. Schosinsky (2006) y T&M (según Botey et al. (2011)) establecen que la lámina húmeda puede fluctuar entre los valores de CC y PMP, siendo únicamente el agua capilar disponible para las plantas la que es agotable; sin embargo, según el planteamiento de Forte Lay, como lo exponen Fernández Long et al. (2012, 2019), la lámina puede llegar a agotarse por debajo del nivel del PMP, alcanzando un límite de desecación (ELD) que es estimado matemáticamente a partir de los valores de lámina en CC y PMP, comprendiendo una fracción húmeda más amplia, compuesta por toda el agua capilar (disponible y no disponible para las plantas).

Éste último aspecto lleva a diferencias en el proceso de recarga del suelo en días húmedos; puesto que, como el PMP determina el límite en el cual las plantas pueden aprovechar la humedad edáfica, cuando el agotamiento de lámina va por debajo de este nivel, debe haber primero una recarga que eleve la humedad del suelo hasta este umbral nuevamente para que las plantas puedan aprovechar el agua. Esto no sucede cuando la lámina evaporable es únicamente comprendida por el agua útil (CC – PMP), donde las plantas pueden aprovechar la humedad tan pronto el suelo comienza a recargarse.

Todos estos elementos distintos influyen en la estimación de la humedad del suelo. Es fácil identificar cada uno y determinar en qué momento del proceso de cálculo estos inician y terminan su aplicación, pudiendo separarlos en componentes que pueden combinarse entre sí para obtener distintos modelos para la estimación del comportamiento de la lámina húmeda del suelo. Estos componentes son:

- **Componentes de infiltración:**

- **Componente de Schosinsky & Losilla (S&L, 1999):** este componente es el que se encarga de la estimación de la fracción pluvial que verdaderamente infiltra en el suelo, la precipitación infiltrada (P_i)

- **Componente de Thornthwaite:** no es realmente un proceso en sí. Simplemente consiste en utilizar la precipitación tal y como se mide o estima para un sitio de interés; la precipitación bruta (PP).
- **Componentes de comportamiento de lámina húmeda almacenada:**
 - **Componente de Schosinsky (2006):** este componente consiste en el modelo desarrollado por Gunther Schosinsky, que determina el agotamiento de lámina a través del coeficiente de humedad del suelo (Ch) para la determinación previa de la ETr, cuyo valor es aplicado a un modelo directo de recarga y agotamiento.
 - **Componente de Thornthwaite & Mather (T&M, 1955, 1957):** este consiste en el modelo condicional desarrollado por T&M, el cual, según el día sea húmedo o árido, entra en efecto un modelo de recarga directo o un modelo de agotamiento exponencial. La ETr es determinada según la diferencia entre el almacenamiento de humedad del día presente y el día anterior.
- **Componentes de capacidad de almacenamiento:**
 - **Componente de Botey et al. (2011):** éste determina que la lámina húmeda agotable es igual a la lámina útil del suelo y, por lo tanto, sus límites son la CC y el PMP.
 - **Componente de Forte Lay (FL):** éste determina que los límites de la lámina húmeda agotable se encuentran entre la CC y el ELD.

Caracterización de los modelos y selección de la propuesta a ser utilizada por la DOA. Para facilitar el proceso de selección y ofrecer a la DOA una manera eficiente de trabajar con las propuestas elaboradas, se programaron dos libros de cálculo en Microsoft Excel: uno conteniendo los seis modelos, lo que permitirá la comparación de resultados en futuras investigaciones; y uno que solamente contiene el modelo seleccionado en el presente trabajo, que permitirá su uso inmediato para el cálculo de balances hídricos.

Para poder estudiar a mayor profundidad el comportamiento de los diferentes modelos propuestos y realizar una caracterización de ellos, así como también evaluar el correcto funcionamiento de los libros de cálculo, se llevó a cabo una prueba, utilizando datos meteorológicos (año 2022) y edafológicos reales del municipio de Nueva Concepción, debido a que sus características fisiográficas permiten explotar las herramientas con las que las distintas propuestas cuentan. Para llevar a cabo esta simulación, se seleccionaron los cultivos de maíz y frijol, dado que el rubro de granos básicos es bastante vulnerable ante las eventualidades de sequía.

La prueba se llevó a cabo en tres fases. La primera se realizó estableciendo condiciones estándar de terreno, tal y como afirman Botey Fullat y Moreno García (2015) que las asume Thornthwaite en su balance hídrico (un pastizal plano); y sin seleccionar un cultivo en específico; siendo éste lo que podría denominarse como un “balance hídrico general”. El propósito de esta fase fue distinguir las diferencias más básicas entre el comportamiento de los modelos, reduciendo al mínimo las influencias externas. Esta prueba se ejecutó desde el mes de abril, hasta el mes de noviembre, correspondiendo con lo que convencionalmente se conoce como la temporada de recarga hídrica, la época lluviosa y la temporada de agotamiento. Esta fase también permitió identificar la temporada a partir de la cual sería viable iniciar el establecimiento de cultivos, según la recarga hídrica del suelo. Cabe mencionar que, ante el desconocimiento de la humedad inicial del suelo en el momento de inicio de la prueba, se tomó la decisión de asumir que éste se encontraba en PMP, considerando que el mes de abril es el último de la época seca y, por lo tanto, no debería de haber obtenido aportes hídricos significativos previamente.

La segunda fase se llevó a cabo bajo las mismas condiciones estándar de terreno; pero, esta vez, estableciendo los cultivos previamente mencionados. El propósito de esta fase fue poder ver el comportamiento de los modelos con el factor cultivo añadido al proceso, siendo su aspecto más importante la variación en la profundidad efectiva a lo largo del tiempo, lo que implica un aumento en la reserva hídrica conforme se desarrolla el cultivo.

Finalmente, para la tercera fase se establecieron condiciones reales de terreno, junto con los cultivos previos. Con ésta, se añadió el factor fisiográfico, cuyo efecto principal ocurre en la infiltración y, por lo tanto, afecta la recarga hídrica del suelo.

A través de los resultados de esta fase, se identificó cuál sería el modelo a seleccionar como el adecuado para su uso inmediato por la DOA.

6.2.3. digitación de libretas climatológicas de “La Providencia”. Se vació el contenido de las libretas climatológicas de la estación agrometeorológica “La Providencia” en un formato de hoja de cálculo para Microsoft Excel, proporcionado por los técnicos de la DOA, el cual es utilizado actualmente para el vaciado rutinario de las libretas climatológicas de las demás estaciones bajo su autoridad. Se realizaron modificaciones al formato conforme fue siendo necesario.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. resultados de actividades planificadas

7.1.1. levantamiento de información de campo en estudio de suelos. Los municipios visitados, por orden cronológico, fueron Chiltiupán, Nueva Concepción, San Juan Opico, El Congo, San Antonio Pajonal, Atiquizaya, San Ignacio, Santa Ana, Jututla y Metapán, siendo estos 10 sitios de los 25 inicialmente planificados.

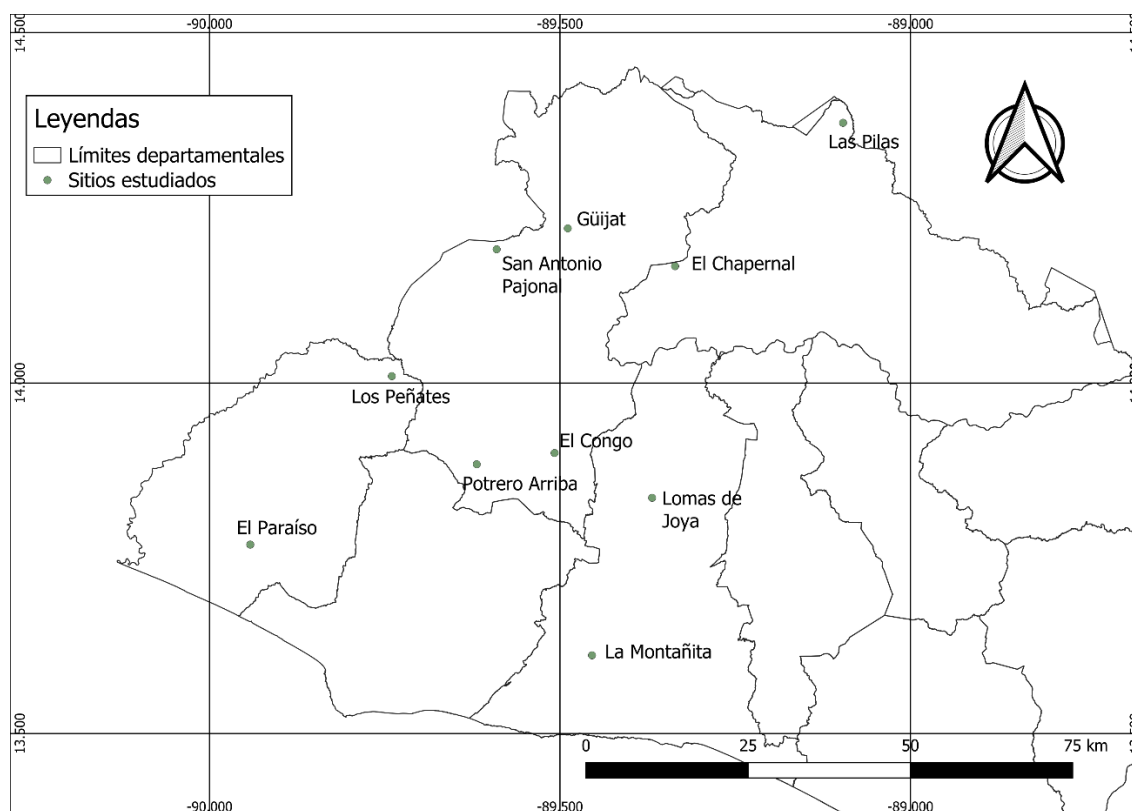


Figura 3. Mapa de sitios estudiados en el levantamiento de suelos

Respecto al estudio hidrológico, se trabajó con el método del permeámetro de Guelph desde el estudio del primer sitio. Se cuenta con información de ocho de los lugares visitados. La metodología de los anillos infiltrómetros se introdujo a partir del segundo sitio, contándose con datos de únicamente siete de los sitios visitados.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el levantamiento de suelos, ordenados en forma de fichas descriptivas. Para consultar el formato vacío de la ficha, ver Anexo 3.

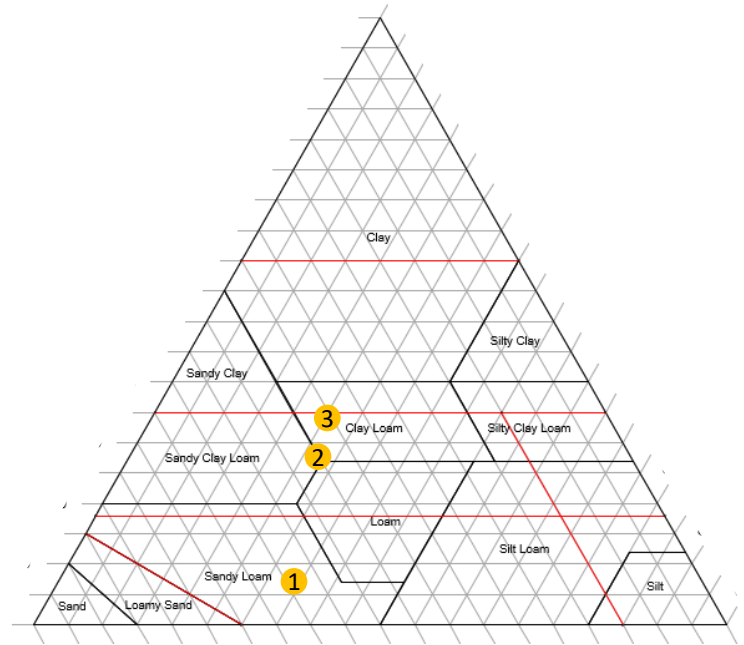
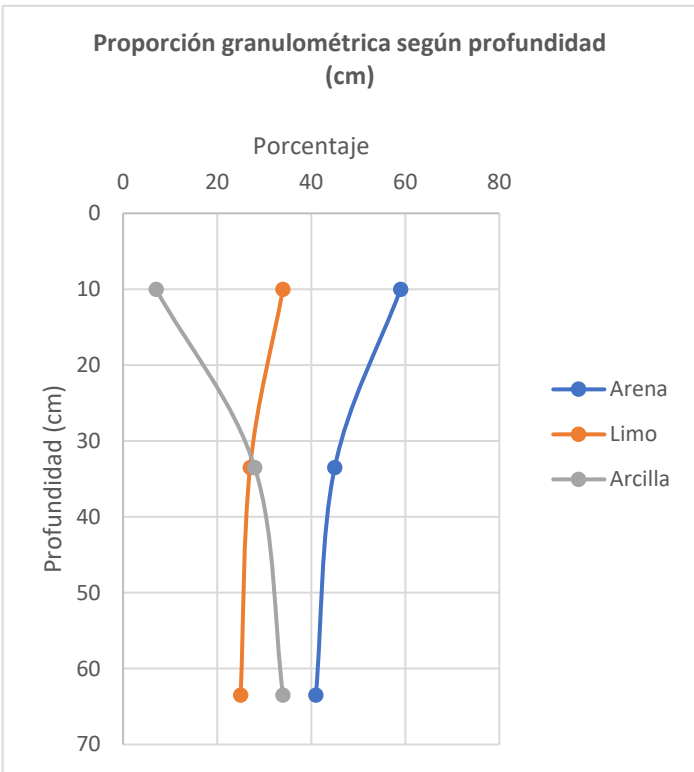


Figura 4. Descripción de un perfil de suelo expuesto a través de una calicata, Cantón Las Pilas, San Ignacio, mayo 2023



Figura 5. Ejecución de pruebas de infiltración, Cantón El Zapote, Nueva Concepción, marzo 2023

Nombre del Sitio	La Montañita
------------------	--------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-20	0.99	7	34	59	FA
2	B	20-47	0.97	28	27	45	FC
3	BC	47-80	0.92	34	25	41	FC

Descripción del Sitio

Código de lugar: Montañita.

Lugar: Chiltiupán, Cantón Cuervo Abajo

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética:
- Taxonómica:

Coordenadas: 13.61154, -89.45430

Fecha: 7 de marzo de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 80 cm.

Humedad: Seco.

Pendiente: 17%, S57°O

Elevación: 728 msnm.

Drenaje: Bien drenado.

Material parental:

Fisiografía: Alomado, pendiente convexa plana, ubicado en ladera superior.

Erosión: Tipo laminar en un 75% del terreno, en surcos en un 10% y tipo cárcava en un 15% de grado ligero.

Pedregosidad: No presente.

Vegetación: Granos básicos, plantas arvenses y arbustos.

Uso actual: Agrícola.

Distribución de las raíces:

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

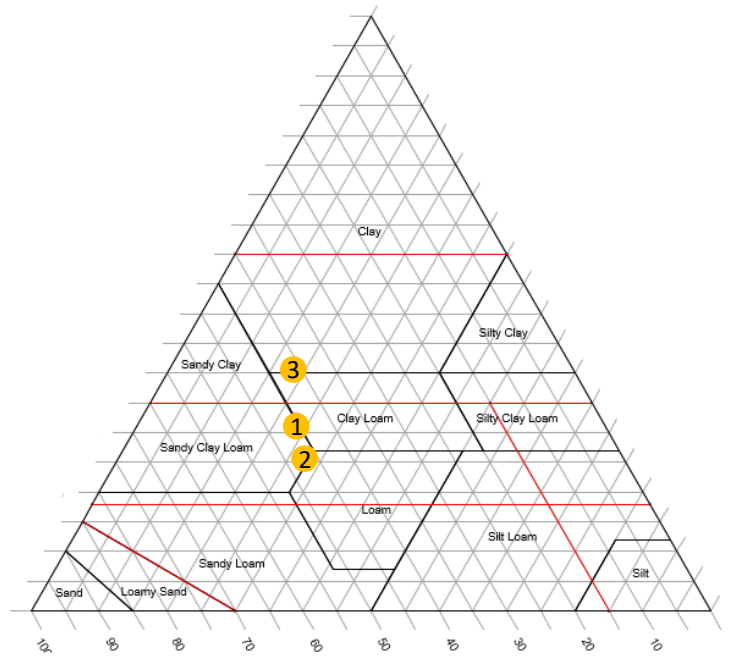
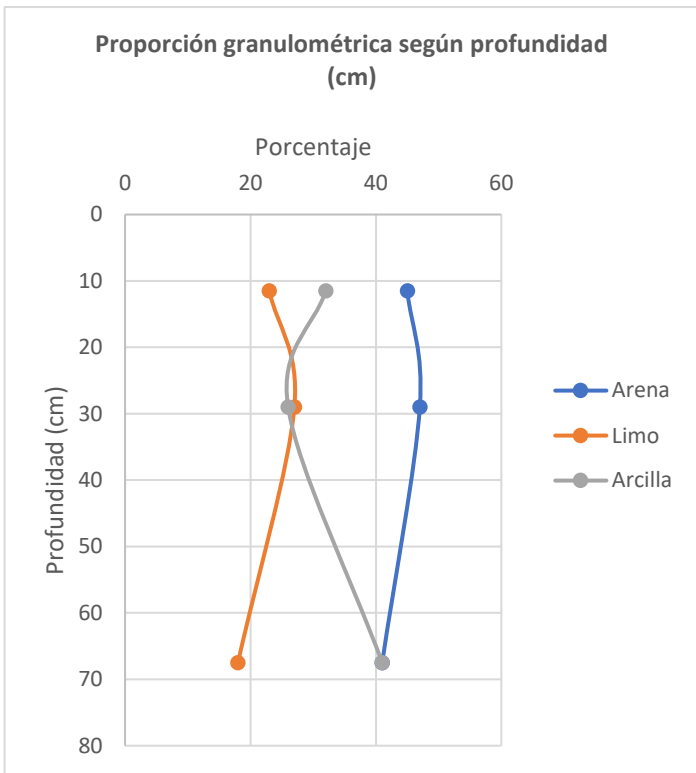
Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-20 cm	Suelo franco arenoso. Estructura de tipo granular, sin presencia de gravilla. Macroporosidad media a alta.
B	20-47 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de bloques subangulares, con presencia de gravilla (<3%). Macroporosidad media.
BC	47-80 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de bloques subangulares de tamaño grueso, con presencia de gravilla de roca meteorizada (5-10%). Macroporosidad baja.

Propiedades Hídricas del Suelo

Conductividad hidráulica (cm/h)*	3.37
-----------------------------------------	------

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Nombre del Sitio	El Chapernal
------------------	--------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-23	0.88	32	23	45	FC
2	B	23-35	0.78	26	27	47	FCA
3	C	35-100	1.09	41	18	41	C

Descripción del Sitio

Código de lugar: Chapernal.

Lugar: Nueva Concepción, Cantón El Zapote

Clima:

Autor: Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética:
- Taxonómica:

Coordenadas: 14.16667, -89.33580

Fecha: 14 de marzo de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 100 cm.

Humedad: Seco.

Pendiente:

Elevación:

Drenaje: Algo excesivamente drenado.

Material parental:

Fisiografía: Alomado, pendiente convexa convexa, ubicado en pendiente superior.

Erosión: Tipo laminar en el 100% del terreno.

Pedregosidad: 10%

Vegetación: Granos básicos, plantas arvenses.

Uso actual: Agrícola en un 80% y 20% sin uso.

Distribución de las raíces: Superficial, muchas raíces finas.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

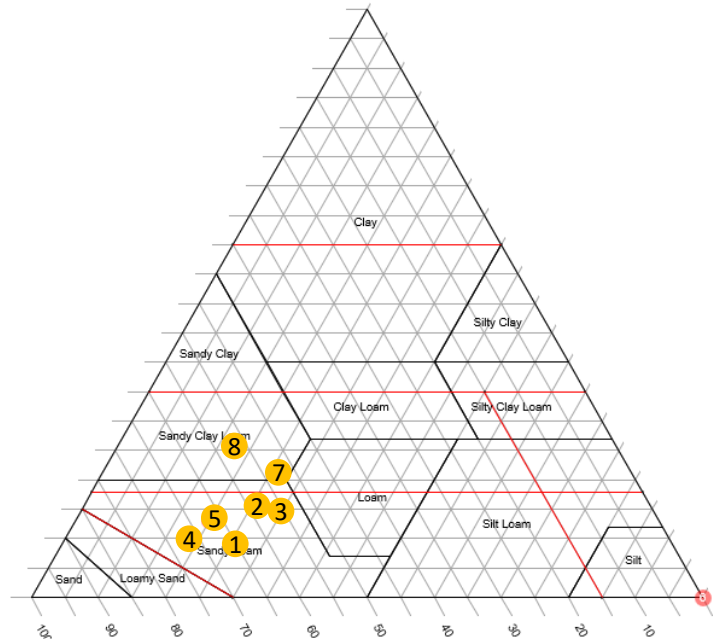
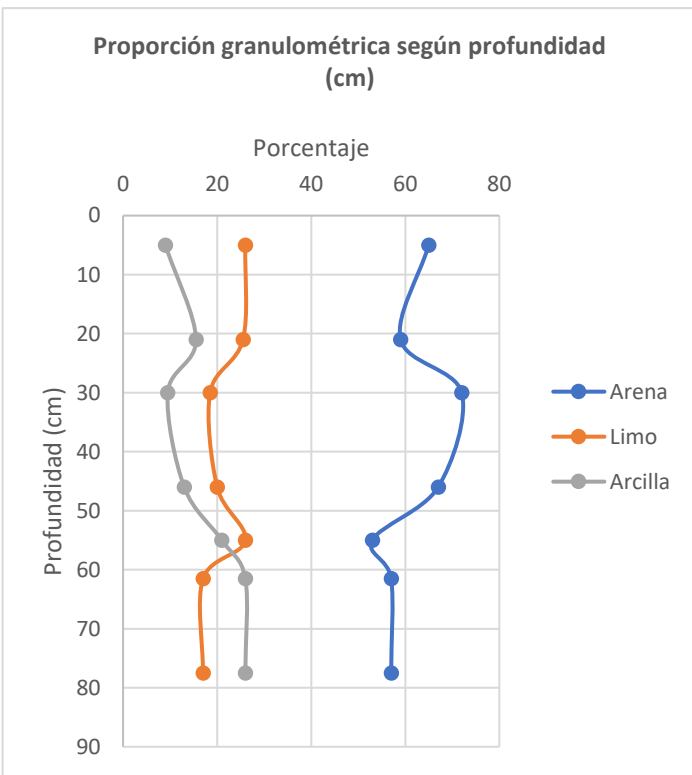
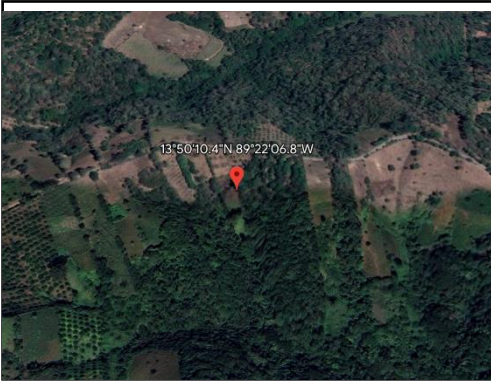
Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-23 cm	Suelo franco arcilloso. Rocas de 5 cm de diámetro (20%).
B	23-35 cm	Suelo franco arcillo-arenoso. Rocas de 3 cm de diámetro (50%).
C	35-100 cm	Suelo arcilloso. Rocas de 23 cm de diámetro (70%).

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	26.14
Conductividad hidráulica (cm/h)*	9.22

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Nombre del Sitio	Lomas de Joya
------------------	---------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-10	0.88	9	26	65	FA
2	AC	10-32	1.11	15.5	25.5	59	FA
3	C	20-40	1.08	14.5	29.5	56	FA
4	2C	32-40	1.22	9.5	18.5	72	FA
5	Ab	40-52	1.74	13	20	67	FA
6	3C	52-58	0.88				
7	4AB	58-65	0.86	21	26	53	FCA
8	4BC	65-90+	0.83	26	17	57	FCA

Descripción del Sitio

Código de lugar: LJ.

Lugar: San Juan Opico, Cantón Lomas de Joya.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: Regosol.
- Taxonómica: Entisol.

Coordenadas: 13.83622, -89.36855

Fecha: 21 de marzo de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 90 cm.

Humedad: Seco.

Pendiente: 29%, S50°O

Elevación: 517 msnm.

Drenaje: Bien Drenado.

Material parental: Erupciones volcánicas y material piroclástico (ceniza volcánica).

Fisiografía: Alomado, pendiente convexa convexa, ubicado en pendiente superior.

Erosión: Tipo laminar y de cárcava en un 80% del terreno, de grado ligero.

Pedregosidad: No presente.

Vegetación: Granos básicos, hortalizas y plantas arvenses (revisar cuaderno).

Uso actual: Agrícola.

Distribución de las raíces: Superficial, muchas raíces finas; a profundidad, presencia moderada de raíces finas y moderada a poca de raíces medias.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-10 cm	Suelo franco arenoso gravilloso. Estructura de tipo granular, de tamaño medio. Poros intersticiales y galerías de lombriz en cantidad moderada. Presencia abundante de raíces finas. Transición de forma lineal y límite claro.
AC	10-32 cm	Suelo franco arenoso gravilloso. Estructura de tipo granular fina. Presencia moderada de poros intersticiales. Presencia moderada de raíces finas. Transición de forma lineal y límite abrupto.
C	20-40 cm	Suelo franco arenoso gravilloso. Sin estructura. Presencia moderada de fracturas. Poca presencia de raíces finas y presencia moderada de raíces medias. Transición de forma quebrada y límite abrupto.
2C	32-40 cm	Horizonte endurecido, poco cementado y con meteorización. Sin estructura. Presencia abundante de fracturas. Presencia moderada de raíces finas. Transición de forma ondulada y límite abrupto.
Ab	40-52 cm	Suelo franco arenoso gravilloso. Estructura masiva. Presencia moderada de galerías. Poca presencia de raíces medias. Transición ondulada de límite abrupto.
3C	52-58 cm	Suelo franco gravilloso. Estructura masiva. Presencia moderada de galerías. Poca presencia de raíces medias
4AB	58-65 cm	Suelo franco arcillo-arenoso gravilloso. Estructura granular fina. Presencia abundante de galerías y poros intersticiales. Pocas concreciones de 0.5 cm y presencia moderada de rasgos redoximórficos de 0.2 cm. Poca presencia de raíces medianas.

4BC	65-90+ cm	Suelo franco arcillo-arenoso graviloso. Estructura de terrones finos. Presencia abundante de galerías y poros intersticiales. Presencia moderada de concreciones de 0.5 cm y presencia moderada de rasgos redoximórficos de 0.3 cm. Poca presencia de raíces medianas.
-----	-----------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	97.80
Conductividad hidráulica (cm/h)*	4.03

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Fotos de Detalle



Figura 1 y 2. Presencia de microflora y fauna edáfica

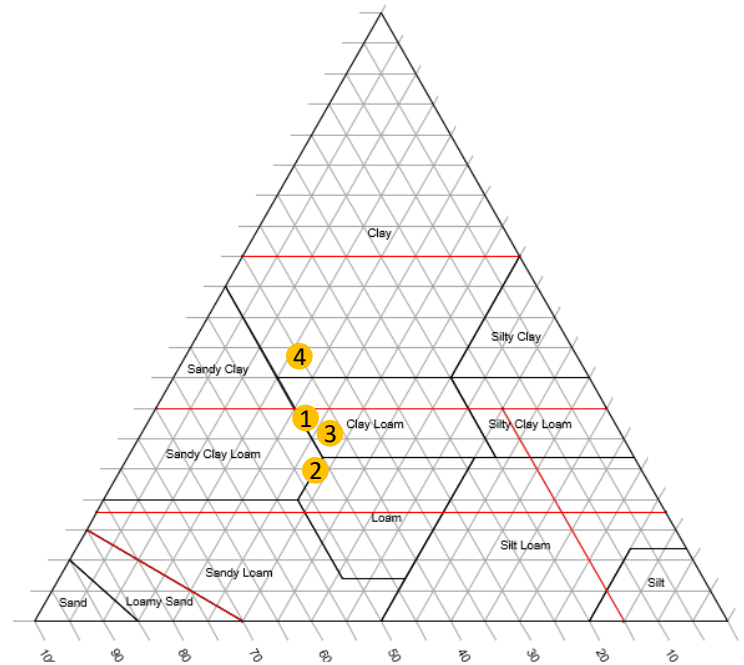
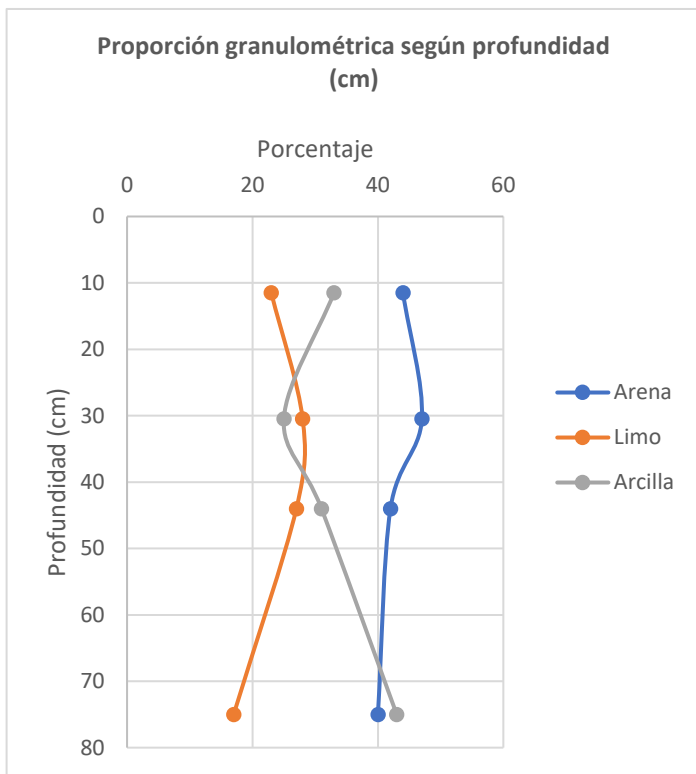
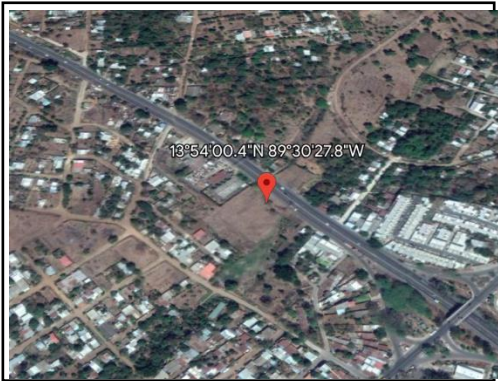


Figura 3. Material constituyente del horizonte C, consistente en ceniza volcánica consolidada.



Figura 4. Apreciación del perfil de suelo estudiado en el sitio.

Nombre del Sitio	El Congo
------------------	----------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-23	1.02	33	23	44	FC
2	BA	23-38	1.07	25	28	47	F
3	B ₁	38-50	0.91	31	27	42	FC
4	B ₂	50-100+	1.59	43	17	40	C

Descripción del Sitio

Código de lugar: Congo.

Lugar: El Congo.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: Latosol pardo forestal.
- Taxonómica: Inceptisol ?.

Coordenadas: 13.9001107, -89.5077261

Fecha: 28 de marzo de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 100 cm.

Humedad: Seco.

Pendiente: 15%, N75°E

Elevación: 850 msnm.

Drenaje: Bien Drenado.

Material parental: Roca ígnea y material piroclástico.

Fisiografía: Alomado, pendiente convexa cóncava, ubicado en cresta/ cumbre.

Erosión: Tipo laminar en un 75% del terreno, en surcos en un 10% y tipo cárcava en un 15% de grado ligero.

Pedregosidad: No presente.

Vegetación: Granos básicos, plantas arvenses.

Uso actual: Agrícola en un 80% y 20% sin uso.

Distribución de las raíces: Superficial, muchas raíces finas y pocas raíces medias; a profundidad, pocas a muy pocas raíces finas.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-23 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de tipo granular de tamaño medio, con un fuerte desarrollo. Poros intersticiales muy finos y abundantes. Poca presencia de concreciones, de tamaño medio a grueso. Abundancia de raíces finas y poca presencia de raíces medianas. Transición de forma lineal y límite gradual.
AB	23-38 cm	Suelo franco. Estructura de tipo granular de tamaño grande, con un fuerte desarrollo. Presencia moderada de poros intersticiales muy finos. Poca presencia de raíces muy finas. Transición de forma lineal y límite gradual.
B ₁	38-50 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de bloques angulares de tamaño grueso, con un fuerte desarrollo. Presencia de pocos poros de forma tubular y diámetro medio y pocas grietas muy gruesas. Presencia moderada de concreciones de tamaño medio y presencia abundante de manchas naranjas de tamaño fino. Muy poca presencia de raíces finas. Transición de forma lineal y límite difuso.
B ₂	50-100+ cm	Suelo arcilloso. Estructura de bloques angulares de tamaño grueso, con un fuerte desarrollo y presencia de revestimiento de arcilla entre agregados. Presencia de pocos poros intersticiales muy finos y pocas grietas muy gruesas. Presencia abundante de concreciones de tamaño mediano y abundantes manchas de óxido de hierro amarillo de tamaño fino.

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	20.30
Conductividad hidráulica (cm/h)*	2.95

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Fotos de Detalle

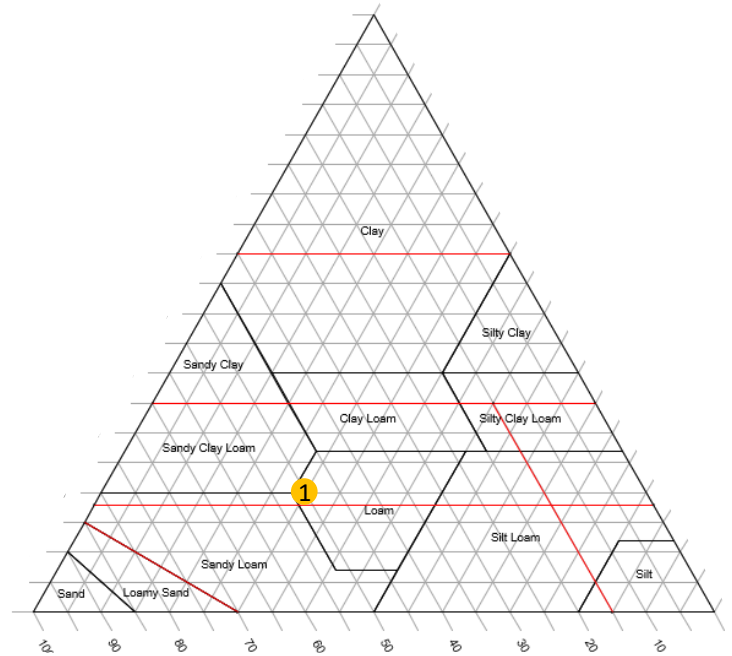
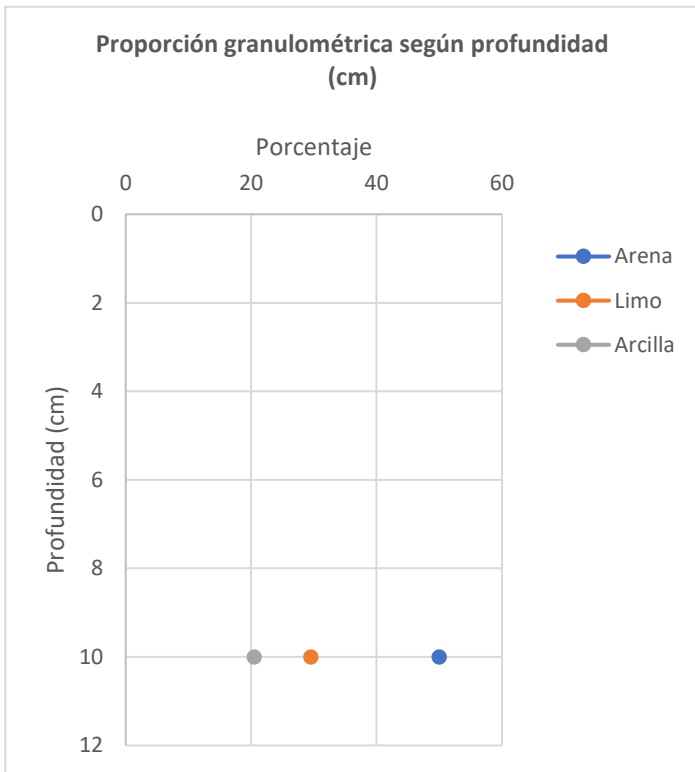
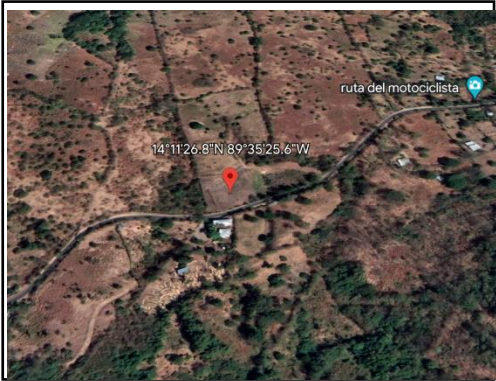


Figura1. Apreciación del perfil de suelo estudiado en el sitio.



Figura 2. Grietas verticales por expansión y contracción de arcillas presentes en horizontes B₁ y B₂.

Nombre del Sitio	San Antonio Pajonal
------------------	---------------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-20	0.65	20.5	29.5	50	F
2	AC	20-50	1.18				
3	C	50-190+					

Descripción del Sitio

Código de lugar: Pajonal.

Lugar: San Antonio Pajonal.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG.

Clasificación:

- Genética: Litosol.
- Taxonómica: Entisol ?.

Coordenadas: 14.190780, -89.590435

Fecha: 18 de abril de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 40 cm.

Humedad: Seco.

Pendiente: 10%, N20°E

Elevación: 569 msnm.

Drenaje: Bien drenado.

Material parental: Escoria y lavas basálticas.

Fisiografía: Alomado, pendiente convexa cóncava, ubicado en cima.

Erosión: Tipo laminar, grado bajo.

Pedregosidad: 20%, clastos subangulares.

Vegetación: Arvense, arbustiva y hoja ancha.

Uso actual: Recreativo. 30% cobertura de frutales, 50% cobertura arbustiva y arvense.

Distribución de las raíces: Superficial, finas y pocas y gruesas, muy pocas; a profundidad, grandes y muy pocas.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-20 cm	Suelo franco. Estructura de tipo migajón, de tamaño fino y desarrollo débil. Poros intersticiales y cavidades tubulares. Poca presencia de raíces finas y muy poca presencia de raíces gruesas. Transición de forma ondulada y límite gradual.
AC	20-50 cm	Horizonte compuesto de fragmentos de roca en proceso de meteorización. Sin textura. Sin estructura. Grietas entre las rocas. Manchas de hierro y manganeso muy grandes y en gran cantidad. Muy poca presencia de raíces gruesas. Transición de forma ondulada y límite gradual.
C	50-190+ cm	Horizonte compuesto de fragmentos de roca en proceso de meteorización. Sin textura. Sin estructura. Grietas entre las rocas. Rasgos redoximórficos por color grisáceo de la roca y materiales meteorizados y manchas de hierro y manganeso.

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	10.36
Conductividad hidráulica (cm/h)	1.18

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Fotos de Detalle

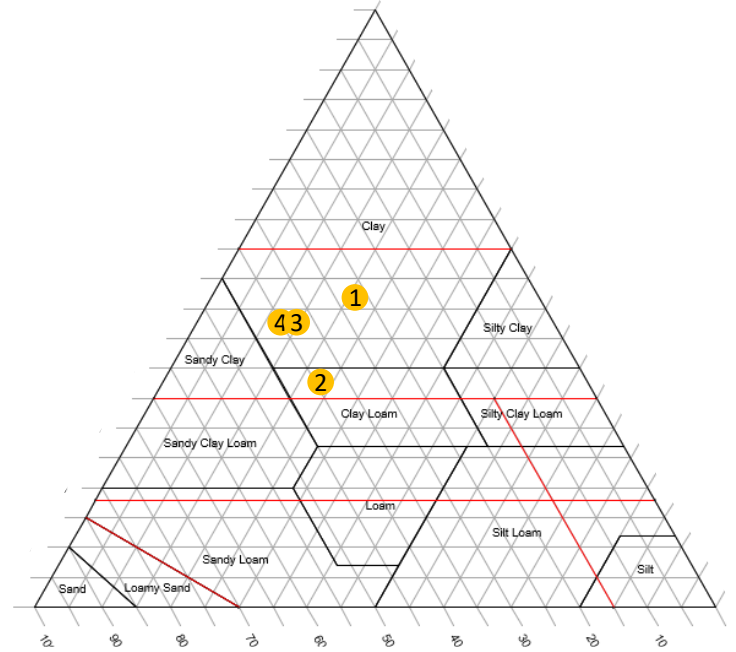
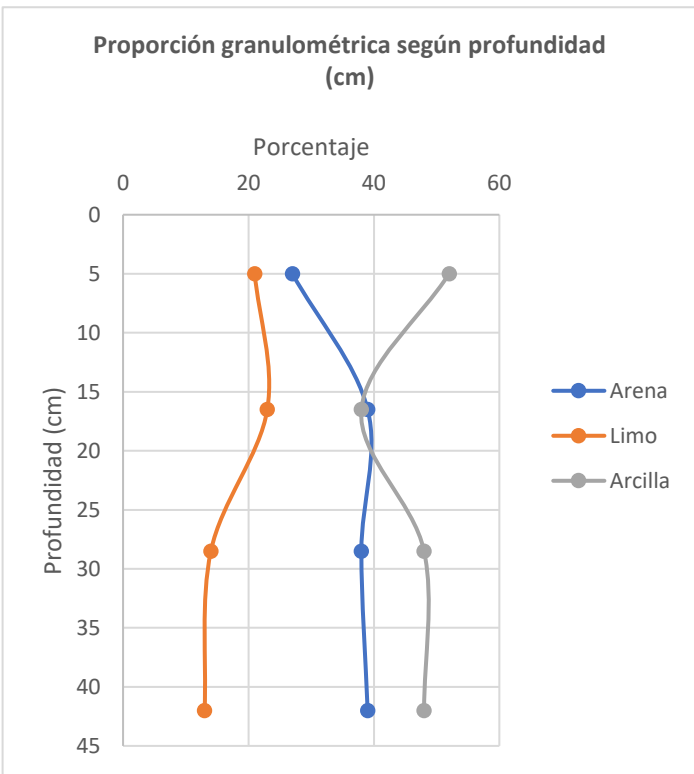
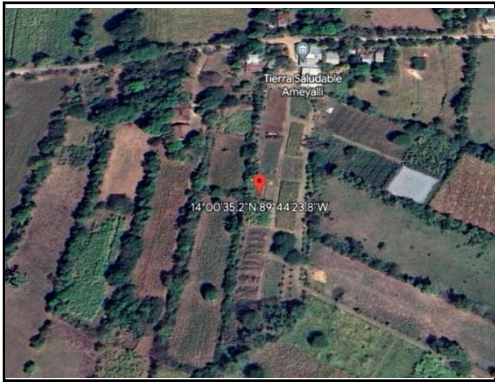


Figura 1. Apreciación de las dimensiones del perfil. El suelo solamente comprende la primera capa de aprox. 20 cm.



Figura 2. Acercamiento al perfil del suelo.

Nombre del Sitio	Los Peñates
------------------	-------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-10	1.08	52	21	27	C
2	BA	10-23	1.11	38	23	39	FC
3	B ₁	23-34	1.09	48	14	38	C
4	B ₂	34-50+	1.03	48	13	39	C

Descripción del Sitio

Código de lugar: Peñates.

Lugar: Atiquizaya, Cantón San Juan El Espino, Caserío Los Peñates.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: Grumosol (Pasaquina ?).
- Taxonómica: Vertisol.

Coordenadas: 14.00977819, -89.7399504

Fecha: 25 de abril de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 60 cm.

Humedad: Húmedo / seco en superficie.

Pendiente: 8%, S70°E

Elevación: 630 msnm.

Drenaje: Algo pobremente drenado.

Material parental: Piroclástico.

Fisiografía: Ligeramente ondulado, pendiente convexa cóncava, ubicado en pendiente baja

Erosión: 10%, tipo laminar, grado ligero.

Pedregosidad: No presente.

Vegetación: Granos básicos, hortalizas y frutales.

Uso actual: Agrícola / conservación de suelos. 80% cobertura de rastrojo.

Distribución de las raíces: Superficial, finas y abundantes; a profundidad, medianas a grandes, pocas.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-10 cm	Suelo arcilloso. Estructura de tipo granular, de tamaño grueso, con un fuerte desarrollo. Poros intersticiales y galerías de lombriz. Mucha presencia de raíces finas. Transición de forma lineal y límite difuso.
BA	10-23 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de tipo bloque, de tamaño mediano a grueso y con un desarrollo moderado. Presencia de pocos poros intersticiales. Poca presencia de raíces medianas. Transición de forma lineal y límite difuso.
B ₁	23-34 cm	Suelo arcilloso. Estructura de tipo bloque, de tamaño grueso, con un fuerte desarrollo; presencia de revestimiento de arcilla. Presencia de pocos poros intersticiales. Poca presencia de raíces medianas. Transición de forma lineal y límite difuso.
B ₂	34-50+ cm	Suelo arcilloso. Estructura de tipo bloque, de tamaño grueso, con un fuerte desarrollo; presencia de revestimiento de arcilla. Presencia de pocos poros intersticiales.

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	12.34
Conductividad hidráulica (cm/h)	0.93

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 15 cm.

Fotos de Detalle

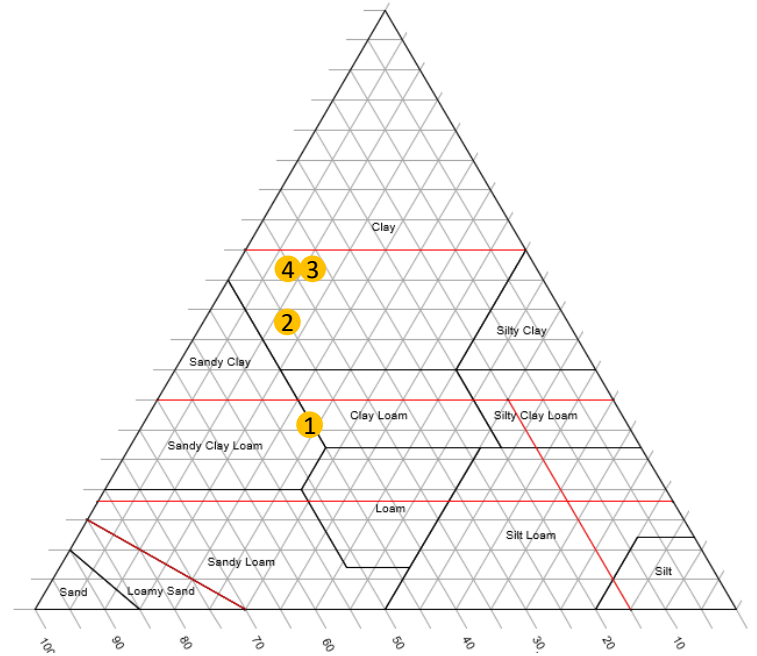
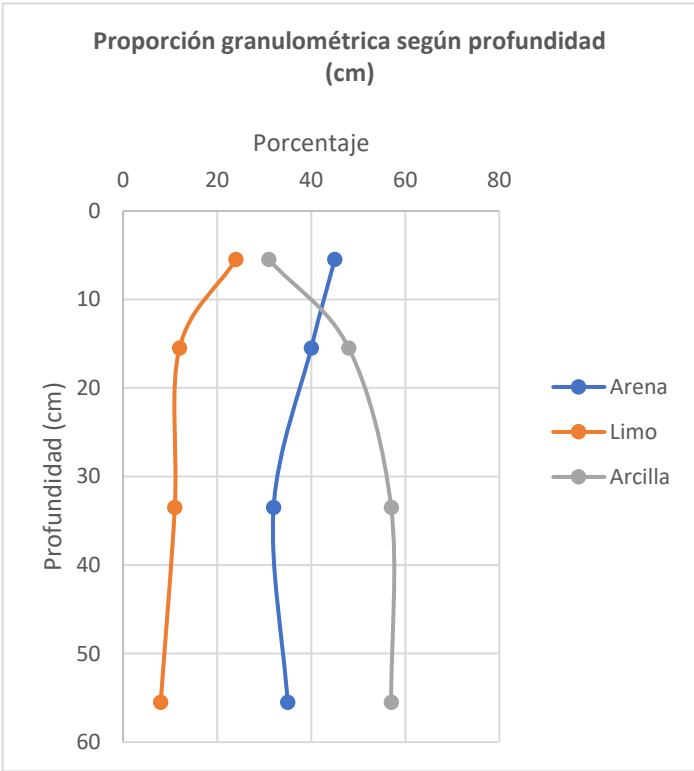


Figura 1. Apreciación del perfil de suelo estudiado.



Figura 2. Diferenciación de los horizontes del suelo a través del contraste de color.

Nombre del Sitio	Cantón Las Pilas
------------------	------------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-11	2.23	31	24	45	FC
2	BA	11-20	2.01	48	12	40	C
3	B ₁	20-47	1.79	57	11	32	C
4	B ₂	47-64+	1.76	57	8	35	C

Descripción del Sitio

Código de lugar: Pilas.

Lugar: San Ignacio, Cantón Las Pilas.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: Latosol arcillo ácido.
- Taxonómica: Alfisol.

Coordenadas: 14.37118, -89.09615

Fecha: 23 de mayo de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 70 cm.

Humedad: Húmedo.

Pendiente: 49%, S31°E

Elevación: 1,896 msnm.

Drenaje: Bien drenado.

Material parental: Lavas félsicas (?).

Fisiografía: Montañoso, fuertemente inclinado, pendiente plana convexa, ubicado en pendiente media.

Erosión: Por surcos, de grado ligero, en un 20% del terreno.

Pedregosidad: Nula.

Vegetación: Arvense, frutales y forestales.

Uso actual: Vivienda, frutales y hortalizas.

Distribución de las raíces: Superficial, finas y medias comunes, raíces gruesas pocas; a profundidad, raíces medias y gruesas pocas.

Observaciones: Presencia de lombrices hasta horizonte B₁.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0-11 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de tipo granular, de tamaño grueso y desarrollo fuerte. Poros intersticiales abundantes y galerías de lombrices con presencia moderada. Raíces finas y medias de presencia común y poca presencia de raíces gruesas. Transición de forma plana y límite gradual.
AB	11-20 cm	Suelo arcilloso. Estructura de tipo bloques subangulares de desarrollo moderado, con revestimiento pobre de arcilla. Pocos poros intersticiales entre bloques y pocas galerías de insectos. Raíces finas y medias de presencia común y poca presencia de raíces gruesas, presencia de raíces descompuestas y microorganismos asociados. Transición de forma plana y límite difuso.
B ₁	20-47 cm	Suelo arcilloso. Estructura de tipo bloques subangulares de desarrollo moderado, con revestimiento pobre de arcilla. Pocos poros intersticiales entre bloques y pocas galerías de insectos. Raíces finas y medias de presencia común y poca presencia de raíces gruesas, presencia de raíces descompuestas y microorganismos asociados. Transición de forma plana y límite difuso.
B ₂	47-64+ cm	Suelo arcilloso. Estructura de tipo bloques subangulares de desarrollo moderado, con revestimiento pobre de arcilla. Muy pocos poros intersticiales entre bloques. Poca presencia de raíces medias y gruesas, presencia de microorganismos asociados.

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	35.07
Conductividad hidráulica (cm/h)	5.26

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Fotos de Detalle

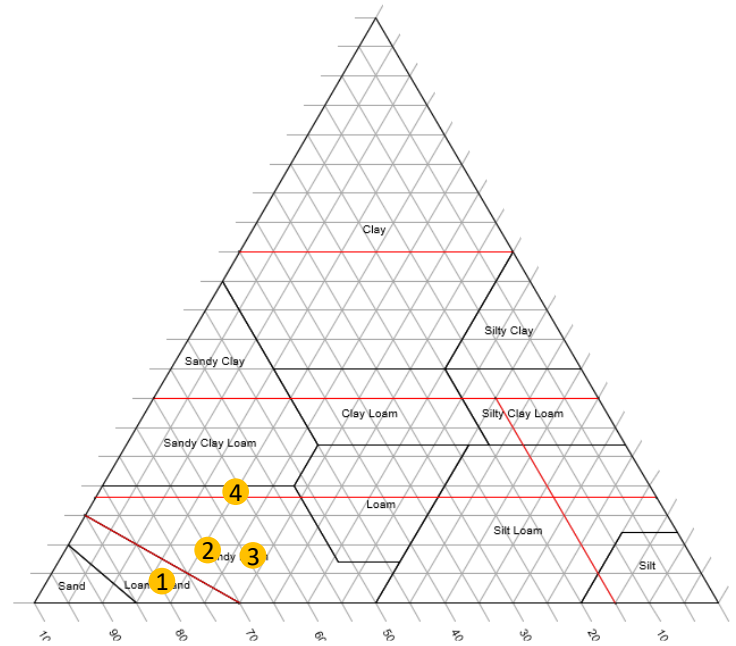
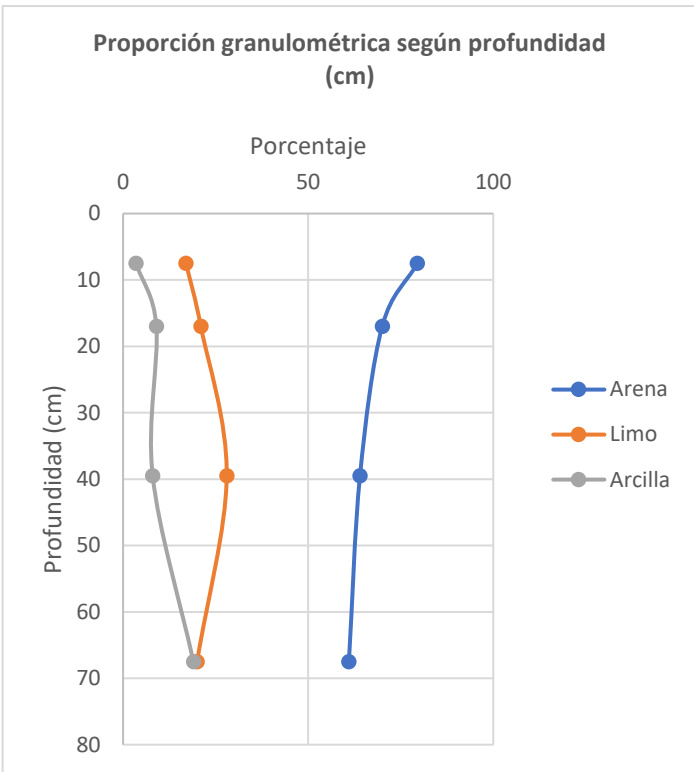


Figura 1. Apreciación del perfil estudiado.



Figura 2. Muestra de material parental de composición de lavas intermedias a félsicas.

Nombre del Sitio	Cantón Potrero Arriba
------------------	-----------------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A	0-15	0.96	3.5	17	79.5	AF
2	CB	15-19	0.98	9	21	70	FA
3	C	19-60	0.79	8	28	64	FA
4	2C	60-75+	0.92	19	20	61	FA

Descripción del Sitio

Código de lugar: Potrero.

Lugar: Municipio de Santa Ana, Cantón Potrero Arriba.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: Regosol latosólico.
- Taxonómica: Andisol/ Inceptisol.

Coordenadas: 13.8840791, -89.6188172

Fecha: 30 de mayo de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 60 cm.

Humedad: Húmedo.

Pendiente: 18%, N45°E

Elevación: 1,386 msnm.

Drenaje: Algo excesivamente drenado.

Material parental: Material piroclástico sin consolidar.

Fisiografía: Relieve en forma dendrítica, quebrado, pendiente plana cóncava, ubicado en pendiente media.

Erosión: Por surcos, de grado ligero, en un 20% del terreno.

Pedregosidad: En un 30% de la superficie.

Vegetación: Arbustiva, sombra de café, maderables.

Uso actual: Agrícola, granos básicos, cafetales.

Distribución de las raíces: Superficial, raíces finas y medias muy frecuentes y muy pocas raíces gruesas; a profundidad, raíces medias comunes y gruesas muy pocas.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0 - 6, 24 cm	Suelo arenoso franco, con presencia de grava fina. Estructura de tipo granular, de tamaño muy fino y desarrollo débil. Poros intersticiales finos y medios abundantes y galerías de lombrices finas y medias abundantes. Raíces finas frecuentes y medias muy frecuentes. Transición de forma ondulada y límite claro.
CB	6, 24 - 9, 30 cm	Suelo franco arenoso, con presencia de grava fina con arcilla como material cementante. Estructura de grano suelto, de tamaño medio y desarrollo débil. Presencia frecuente de poros intersticiales finos, con tierra fina dentro. Raíces finas de presencia frecuente y muy poca presencia de raíces gruesas. Transición de forma ondulada y límite claro.
C	9, 30 - 60 cm	Suelo franco arenoso. Estructura migajosa (?) de tamaño grueso y desarrollo débil. Presencia frecuente de poros intersticiales finos, con tierra fina dentro. Raíces medias de presencia común y muy poca presencia de raíces gruesas. Transición de forma lineal y límite abrupto.
2C	60 - 75+ cm	Suelo franco arenoso. Estructura masiva de tamaño grueso. Presencia frecuente de intersticiales de tamaño fino y muy fino, con tierra fina dentro.

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	86.34
Conductividad hidráulica (cm/h)	6.03

* La conductividad hidráulica se tomó a una profundidad de 30 cm.

Fotos de Detalle

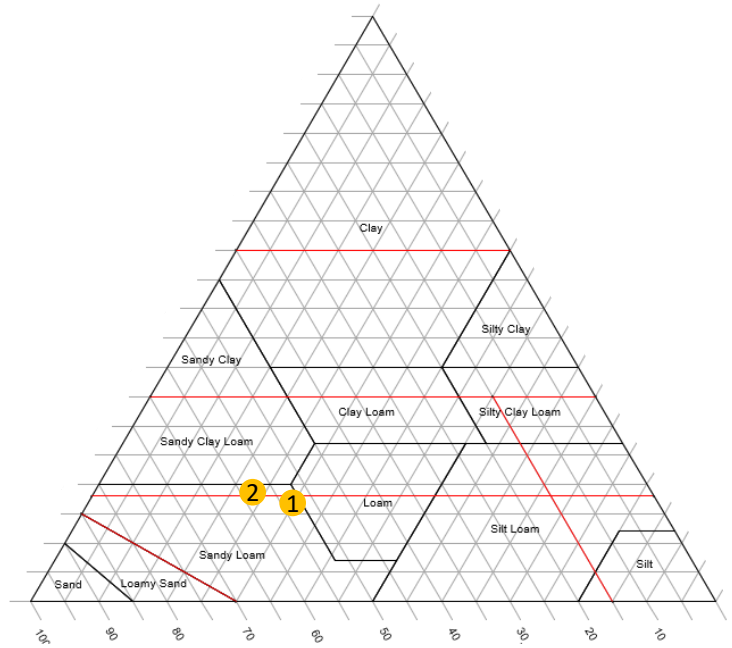
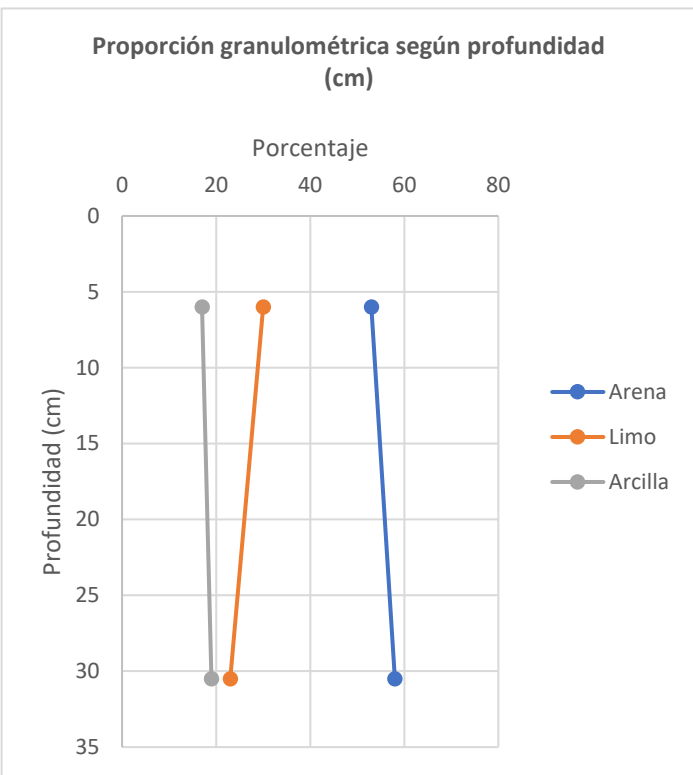
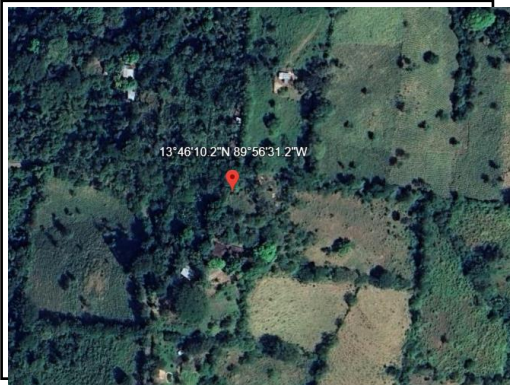


Figura 1. Apreciación del perfil estudiado



Figura 2. Presencia de pendientes bastante pronunciadas.

Nombre del Sitio	Caserío El Paraíso
------------------	--------------------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	A1	0-12	0.95	17	30	53	FA
2	A2	12-49	0.90	19	23	58	FA
3	B(C)	49-62+	0.92				

Descripción del Sitio

Código de lugar: Paraíso.

Lugar: Municipio de Jujutla, Cantón San José Naranjo, Caserío El Paraíso.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: .
- Taxonómica: .

Coordenadas: 13.76949, -89.94199

Fecha: 13 de junio de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 62 cm.

Humedad: Húmedo.

Pendiente: 30%, S60°E

Elevación: 319 msnm.

Drenaje: Algo Excesivamente Drenado.

Material parental: Lavas andesíticas.

Fisiografía: Fuertemente ondulado, pendiente convexa plana, ubicado en pendiente superior.

Erosión: Tipo laminar de grado moderado en la totalidad del terreno.

Pedregosidad: Fragmentos redondeados en un 10% del terreno.

Vegetación: Frutales, hortalizas, granos básicos y forestales.

Uso actual: Agrícola, forestal y obras de conservación de suelo.

Distribución de las raíces: Superficial, muchas raíces finas y muy finas y pocas raíces medias; a profundidad, muy pocas raíces finas.

Observaciones: No hay observaciones.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
A ₁	0-12 cm	Suelo franco arenoso. Estructura de tipo granular de tamaño medio, con un desarrollo débil. Presencia abundante de galerías de lombrices finas y medias. Abundancia de raíces muy finas y presencia frecuente de raíces finas. Transición de forma lineal y límite gradual.
A ₂	12-49 cm	Suelo franco arenoso, con poca presencia de roca meteorizada. Estructura de bloques subangulares de tamaño fino, con un desarrollo moderado. Presencia abundante de galerías de lombrices finas y medias. Presencia de insectos y microorganismos. Raíces finas comunes y pocas raíces medias. Transición de forma lineal y límite gradual.
B(C)	49-62+ cm	Suelo franco arcilloso, con mucho material en proceso de formación y presencia común de roca meteorizada. Estructura de bloques subangulares de tamaño grueso, con un desarrollo débil; presencia escasa de arcilla iluviada entre agregados y revestimiento en la superficie de los poros. Presencia común de galerías de lombrices de tamaño medio. Muy poca presencia de raíces medianas.

Fotos de Detalle

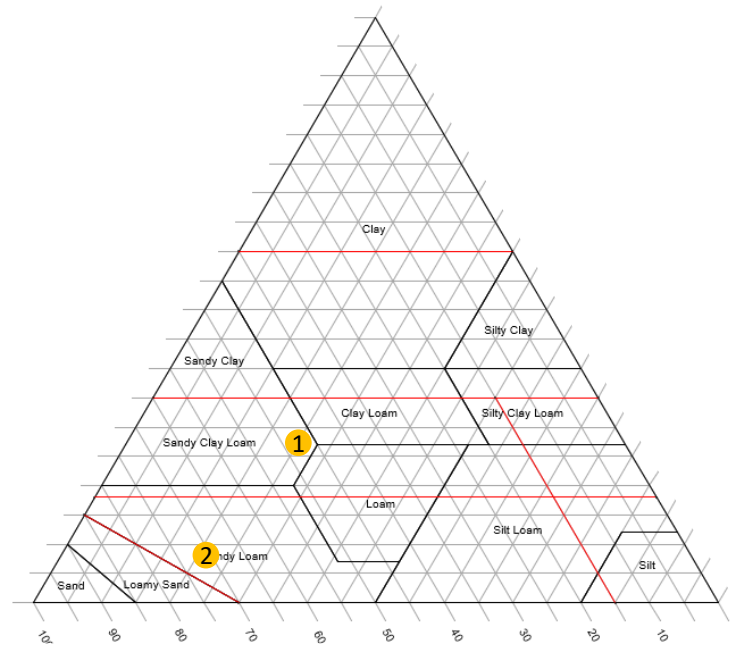
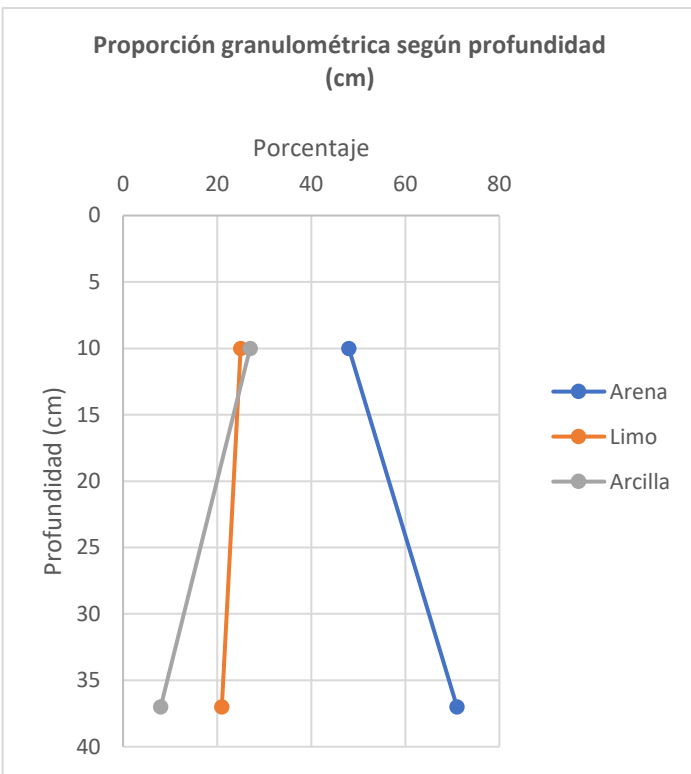


Figuras 1. Apreciación del perfil estudiado.



Figuras 2 a 5. Presencia de fauna y microflora edáfica.

Nombre del Sitio	Güijat
------------------	--------



Correlativo	Horizonte	Prof. (cm)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Análisis mecánico %			Textura
				Arcilla	Limo	Arena	
1	AT	0-20	1.11	27	25	48	FCA
2	Ab	20-54	1.27	8	21	71	FA (?)
3	Bg	54-65+	2.00				

Descripción del Sitio

Código de lugar: Güijat

Lugar: Municipio de Metapán, Cantón Belén Güijat, Colonia San Francisco Guajoyo.

Clima:

Autor: Marroquín Reina, JG; Sosa Escobar, DA.

Clasificación:

- Genética: .
- Taxonómica: .

Coordenadas: 14.2206430, -89.4889074

Fecha: 27 de junio de 2023.

Características y Observaciones

Profundidad: 65 cm.

Humedad: Húmedo.

Pendiente: 5-7%

Elevación: 319 msnm.

Drenaje: Algo Excesivamente Drenado.

Material parental: Lavas basálticas tipo escorias y lavas vesiculares.

Fisiografía: Plano (?).

Erosión: Tipo laminar en 20% de la superficie.

Pedregosidad: Afloramientos rocosos en 30% del terreno.

Vegetación: Arvenses, arbustos, frutales, rastrojo y cultivos anuales.

Uso actual: Granos básicos y frutales.

Distribución de las raíces: Superficial, muchas raíces finas y muy finas y pocas raíces gruesas; a profundidad, pocas raíces finas.

Observaciones: Capa superficial de 5 cm de espesor, producto del transporte antrópico de basalto vesiculado negro y rojo.

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
AT	0-20 cm	Suelo franco arcilloso. Estructura de tipo granular muy fina, con un desarrollo moderado a débil; revestimientos de arcilla en galerías. Presencia frecuente de poros intersticiales finos y pocas galerías de lombrices de tamaño medio. Abundancia de raíces finas y muy finas y poca presencia de raíces gruesas. Transición de forma lineal y límite abrupto.
Ab	20-54 cm	Suelo arcillo limoso. Estructura de bloques subangulares de tamaño medio a grueso, con un desarrollo fuerte. Presencia abundante de poros finos y poca presencia de poros de tamaño medio entre agregados. Caras de espejuelo de color gris entre pedos de ocurrencia frecuente (?). Poca presencia de raíces finas. Transición de forma lineal y límite gradual.
Bg	54-65+ cm	Suelo arcillo limoso. Estructura de bloques subangulares muy gruesos, con un desarrollo fuerte. Pocos poros muy finos entre agregados. Coloración gris entre horizontes, producto de reacciones de reducción.

Fotos de Detalle



Figura 1. Apreciación del perfil estudiado. Horizonte superficial de color más claro, conformado por material natural transportado por el hombre.



Figura 2. Slickensides en los agregados del suelo.

7.1.1.1. resumen del estudio de infiltración base

Cuadro 12. Infiltración base de los sitios estudiados

Sitio	n	b	(e ^{Ab})=k	Tb	Ib (cm/h)	Ib (cm/día)	Ecuación de infiltración
Santa Rosa Guachipilín	-0.30	4.81	122.66	178.85	26.14	627.30	$I = 122.66x^{-0.2981}$
Lomas de Joya	-0.04	4.72	111.99	25.20	97.80	2347.19	$I = 111.99x^{-0.042}$
El Congo	-0.13	3.56	35.28	76.46	20.30	487.28	$I = 35.283x^{-0.046}$
Pajonal	-0.02	2.39	10.92	12.52	10.36	248.61	$I = 10.92x^{-0.0209}$
Los Peñates	-0.44	4.96	142.09	263.08	12.34	296.27	$I = 142.094x^{-0.438}$
Las Pilas	-0.02	3.60	36.46	10.07	35.07	841.78	$I = 36.46x^{-0.0168}$
Las Nubes	-0.22	5.53	251.30	131.40	86.34	2072.14	$I = 251.30x^{-0.2190}$

Al comparar los resultados obtenidos con el cuadro 4, podemos observar que estos corresponderían a suelos de textura arenosa. En algunos casos, estos valores de infiltración incluso exceden el valor máximo de dicha categoría. Sin embargo, gracias al estudio edafológico realizado, sabemos que los suelos estudiados varían dentro de todo el espectro de texturas existentes en los suelos. También, al comparar los valores obtenidos con los presentados por el cuadro 5, podemos ver que todos los sitios estudiados calificarían, como mínimo, dentro de la categoría de “alta capacidad de infiltración”; lo cual no es lo esperado para las características edáficas identificadas en los sitios estudiados.

Ante esto, pudiese asumirse que existen factores que podrían estar influyendo en los resultados, que no se hayan tomado en cuenta en su momento y que requieren de particular atención; por lo que fuese necesario estudiar más a fondo dichos sitios, con tal de entender, con mayor profundidad, las causas detrás de los valores obtenidos.

7.1.1.2. resumen del estudio de conductividad hidráulica

Cuadro 13. Conductividad hidráulica de los sitios estudiados

Sitio	Profundidad (cm)	R1 (cm/min)	R2 (cm/min)	C	K _{fs} (cm/min)	K _{fs} (cm/h)
La Montañita	30	0.35	0.85	35.22	0.06	3.37
El Chapernal	30	0.9	2.25	35.22	0.15	9.22
Lomas de Joya	30	0.9	1.65	35.22	0.07	4.03
El Congo	30	1.45	2.25	35.22	0.05	2.95
Pajonal	30	0.2	0.4	35.22	0.02	1.18
Los Peñates	15	1.7	4	2.15	0.02	0.93
Las Pilas	30	0.8	11	2.15	0.09	5.26
Las Nubes	30	0.8	1.75	35.22	0.1	6.03

Al comparar los resultados con los parámetros del cuadro 5, podemos ver que los sitios estudiados presentan una conductividad hidráulica que clasifica dentro del rango de “moderadamente alta” a “alta”. Al confrontar dichos valores con los presentados por el cuadro 4, encontramos que las texturas de suelo de los sitios estudiados deberían de encontrarse en el rango entre franco - arcillosa a arenosa.

A grandes rasgos, es posible decir que los resultados de esta prueba se encuentran más cerca de lo esperado, en comparación a los obtenidos por medio del infiltrómetro de doble anillo. Sin embargo, siempre se presentan valores que pudiesen considerarse anómalos, hasta que se toma en consideración varias de las particularidades presentes en cada sitio estudiado.

En el sitio denominado “La Montañita”, el resultado de la prueba fue $K_{fs} = 3.37$ cm/h, considerándose una conductividad hidráulica “moderadamente alta”, según los parámetros mostrados en el cuadro 5. Si contrastamos este valor con los que expone el cuadro 4, podemos observar que éste es un valor típico de suelos de textura franco arenosa. A la profundidad de 30 cm, en la que se realizó la prueba, encontramos una textura franco arcillosa; aunque muy cercana al umbral donde puede considerarse franco arcillo-arenosa, según el estudio edáfico realizado en el lugar.

El valor máximo de conductividad hidráulica se obtuvo en el sitio denominado “El Chapernal”, siendo $K_{fs} = 9.22$ cm/h, que calificaría como una conductividad “alta”. Según el estudio edafológico realizado, a 30 cm de profundidad, el suelo cuenta con una textura franco arcillo-arenosa. Sin embargo, si contrastamos

el K_{fs} obtenido para el sitio con los parámetros ofrecidos por el cuadro 4, éste es un valor típico en suelos de textura arenosa.

En el sitio denominado “Lomas de Joya”, el resultado de la prueba fue $K_{fs} = 4.03$ cm/h, considerándose una conductividad hidráulica “alta”; y su valor siendo típico de suelos de textura franco arenosa a arenosa, coincidiendo con la textura encontrada en el estudio edáfico, a la profundidad de 30 cm en que se realizó la prueba (siendo franco arenosa la textura exacta). Cabe mencionar que en este sitio fue muy difícil estabilizar la velocidad de infiltración, lo cual seguramente se debió a la muy compleja configuración del perfil del suelo, que contaba con algunas capas permeables endurecidas, producto de las erupciones volcánicas que afectaron a la zona, según comentarios del especialista en suelos.

En el sitio “El Congo”, el resultado de la prueba fue $K_{fs} = 2.95$ cm/h, considerándose una conductividad hidráulica “moderadamente alta”. Este valor es típico de texturas franco arenosas a arenosas. A 30 cm de profundidad, sin embargo, la textura que pudo identificarse fue franca, muy cercana al umbral de lo que puede considerarse franco arcillo-arenosa; siendo las texturas a lo largo del perfil predominantemente arcillosas. Una característica particular observada fue la presencia de grietas por expansión de arcillas a partir de los 38 cm de profundidad, lo que podría contribuir a los aparentemente elevados valores de infiltración.

En el sitio “Pajonal”, el resultado de la prueba fue $K_{fs} = 1.18$ cm/h, considerándose una conductividad hidráulica “moderadamente alta” y típico de texturas francas a franco arenosas. Sin embargo, este sitio cuenta con la particularidad de tener un suelo somero, de solamente 20 cm de profundidad; y, aunque la textura de éste es franca, a la profundidad que se midió la conductividad (30 cm), nos encontramos con un horizonte de roca en proceso de meteorización. Por lo tanto, los valores de conductividad hidráulica se deben más bien a la infiltración del agua entre las grietas del horizonte rocoso.

En el caso del sitio “Los Peñates”, donde se obtuvo el valor mínimo de conductividad hidráulica, fue necesario llevar a cabo la prueba a 15 cm de profundidad, puesto que, a 30 cm, la columna de agua no reducía su nivel. El resultado fue $K_{fs} = 0.93$ cm/h, que, al contrastarlo con el cuadro 5, se consideraría una conductividad “moderadamente alta”, siendo un valor típico de suelos francos a franco arcillosos. Este sitio se caracteriza por la presencia de un suelo pesado, de textura franco arcillosa a la profundidad a la que se realizó la prueba; y de textura arcillosa tanto por encima como por debajo del horizonte estudiado, estando los resultados dentro del rango esperado según los parámetros. Sin embargo, ante el hecho que, a mayores profundidades, el suelo tiene mucha dificultad para infiltrar, podemos afirmar que la

conductividad presenta un componente horizontal más predominante en este caso, cuya magnitud siempre es menor, comparado al desplazamiento vertical de la humedad. También, según el estudio edáfico, la presencia de raíces en estos horizontes era muy escasa. Esto, sumado a su textura pesada, deriva en la presencia de una capa de suelo prácticamente impermeable, como mínimo, a partir de los 30 cm.

En el sitio “Las Pilas”, el resultado de la prueba fue $K_{fs} = 5.26$ cm/h, considerándose una conductividad hidráulica “alta” y típico de texturas franco arenosas a arenosas. Sin embargo, a la profundidad en que se realizó la prueba (30 cm), la textura identificada a través del estudio edáfico fue arcillosa, y el horizonte presentaba muy poca porosidad observable; aunque sí una presencia fuerte de raíces finas y medianas, así como materia orgánica en distintos grados de descomposición y organismos asociados a estos procesos; lo que explica la atenuación de las características arcillosas del suelo respecto a su comportamiento hídrico.

En el sitio “Las Nubes”, el resultado de la prueba fue $K_{fs} = 6.03$ cm/h, considerándose una conductividad hidráulica “alta” y típico de texturas franco arenosas a arenosas. Esto se encuentra dentro de los valores esperados, pues, a los 30 cm de profundidad, la textura identificada fue franco arenosa. Este sitio se caracterizaba por tener un suelo bastante joven, de texturas gruesas que demuestran su formación relativamente reciente. Según el especialista en suelos, el material parental consistía de material piroclástico sin consolidar.

7.1.2. recuperación y digitación de libretas climatológicas de la estación agrometeorológica “La Providencia”.

7.1.2.1. descripción general de la información. Se recuperaron las libretas climatológicas registradas por cada mes, desde septiembre de 1976, cuando la estación fue establecida; hasta febrero de 2012, cuando fue clausurada. El vaciado fue llevado a cabo en un formato de Microsoft Excel, elaborado por la DOA (Ver Anexo 4). Éste fue modificado según fue siendo necesario, dado que existía información y fenómenos meteorológicos dentro las libretas para los que no existía una entrada.

Debido a que la estación inició sus operaciones no estando completamente equipada, ni los observadores completamente capacitados, durante el período entre septiembre 1976 a mayo 1977, se registraban los siguientes datos: temperatura máxima y mínima, temperatura seca y húmeda, humedad relativa, precipitación, rumbo y fuerza del viento (según escala de Beaufort), nubosidad, visibilidad, humedad del suelo, rocío y fenómenos especiales.

A partir de junio 1977, se instalaron geotermómetros a distintas profundidades y empezó a registrarse la temperatura del suelo. A partir de febrero 1978, se comenzó a registrar la evaporación según termómetro de Piché. En abril 1978, inició el registro del viento por anemómetro (sin prescindir del método anteriormente mencionado para registro de viento). En julio 1978, se instaló un tanque evaporímetro clase A, con su respectivo pluviómetro y un termómetro SIX, por lo que se empezó a registrar la evaporación según tanque, la precipitación junto al tanque y la temperatura máxima y mínima del agua almacenada en éste. A partir de diciembre 1981, se dejó de registrar la temperatura del agua del tanque por motivos no especificados.

A partir de enero de 2005, comenzó a registrarse la luz solar, la radiación global y la cantidad de horas en el día que mantenían condiciones de humedad relativa por encima de 85%. A partir de febrero 2010, dejó de registrarse este último dato.

A partir de enero 2011, dejó de registrarse la evaporación por tanque clase A. A partir de octubre del mismo año, dejaron de registrarse la temperatura del suelo, la luz solar y la radiación global. En enero 2012, se dejó de registrar la evaporación según evaporímetro de Piché. Finalmente, en febrero, cesó el registro casi por completo, solamente habiéndose tomado datos el día 8, a las 7:00 a.m., de temperatura máxima y mínima, temperatura seca, humedad relativa, precipitación (los tres tiempos) y viento por anemómetro. La toma de datos de precipitación persistió hasta abril del mismo año. A partir de entonces, los registros cesaron por completo.

La toma de datos se realizaba a diario (incluso en días de asueto) desde la apertura de la estación; pero, a partir de abril de 1998, por motivos no especificados, comenzó a dejarse de tomar datos durante los fines de semana y los días de vacación. A partir de mayo 2009, se recuperó el régimen diario de toma de datos; pero, en marzo 2010, nuevamente se dejó de tomar datos en fines de semana y días de asueto; manteniéndose así hasta el momento del cierre de la estación.

No todas las libretas climatológicas fueron encontradas, por lo que existen vacíos de información para los siguientes meses: diciembre 1996, abril 2001 y marzo 2011. Cabe mencionar que todo el año 1994 se encontraba ausente, por lo que no se dispone de ningún dato correspondiente.

Esta información, ahora almacenada en formato digital, pasa a formar parte de la base de datos del MARN, donde complementará a la información recolectada por la estación telemétrica en funciones, integrándose en una sola serie climatológica de datos que contribuirá a la precisión de los estudios

ejecutados por la Gerencia de Meteorología, tales como pronósticos de precipitaciones basados en datos históricos.



Figura 6. Digitación de libretas climatológicas de estación "La Providencia", Universidad de El Salvador, San Salvador, abril 2024

7.1.3. diseño de una propuesta de balance hídrico. Con los seis componentes metodológicos identificados, se desarrollaron las siguientes propuestas a través de sus combinaciones:

- **Modelo de Schosinsky (Scho):** El modelo de Schosinsky original, que trabaja predefinidamente con el componente de infiltración de S&L y el componente de capacidad de almacenamiento de Botey et al. (siendo esto último una coincidencia metodológica entre estos autores).
- **Modelo de Schosinsky - Forte Lay (Scho-FL):** Muy similar al modelo anterior, con la diferencia que su componente de almacenamiento es el desarrollado por FL.
- **Modelo de Thornthwaite & Mather – AEMET (T&M (A)):** El modelo de T&M como lo proponen Botey et al. en su trabajo, con sus componentes de infiltración (Thornthwaite) y de almacenamiento respectivos.
- **Modelo de Thornthwaite & Mather – Forte Lay (T&M-FL):** El modelo de T&M como lo proponen Fernández Long et al., con sus componentes de infiltración (Thornthwaite) y de almacenamiento respectivos.
- **Modelo de Schosinsky – Thornthwaite & Mather – AEMET (Scho-T&M (A)):** Primer modelo completamente combinado. Junta el componente de infiltración de S&L, el componente comportamiento de lámina de T&M y el componente de almacenamiento de Botey et al.

- **Modelo de Schosinsky – Thornthwaite & Mather – Forte Lay (Scho-T&M-FL):** Segundo modelo completamente combinado, bastante similar al anterior; con la diferencia de utilizar el componente de almacenamiento de FL.

7.1.3.1. elaboración de hoja de cálculo. Se ha elaborado un libro de cálculo con el propósito de facilitar el proceso de comparación de resultados entre los seis modelos propuestos. Éste cuenta con múltiples hojas, las cuales pueden ser agrupadas en dos categorías: “hojas de referencia u hojas de datos” y “hojas de procesamiento”. A continuación, se explica a detalle el contenido de éstas.

- **Hojas de referencia.** Las hojas de referencia son aquellas en las que se introducen los datos de entrada para la computación de los balances hídricos según los modelos propuestos. Éstas son tres y se encuentran clasificadas de la siguiente manera:

Hoja de datos edáficos:

<i>Ingreso y Determinación de Información Edáfica</i>			
Ingreso de Datos del Sitio			
Ubicación			
Municipio	Coordenadas		
Cantón	Latitud		
Caserío	Longitud		
Datos del Suelo			
Textura	Pendiente	Muy plana (0.02% - 0.06%)	
Densidad aparente (g/cm ³)	Cobertura vegetal	Cobertura con zacate (má.)	
Profundidad del suelo (cm)			
Propiedades Hídricas del Suelo			
CC		PMP	
%w	%w	%v	%v
	0.000		0.000
Agua disponible	%w	%w	0.000
	%v	%v	0.000
Infiltración base (mm/día)			
Humedad total del suelo al momento de la medición	%w		
	%v	0.000	
Factores Determinantes de la Infiltración			
Coeficiente de Retención del follaje (Cfo)			
Bosques muy densos	0.2		
Otros	0.12		
Componente de infiltración por pendiente (Kp)			
Muy plana (0.02% - 0.06%)	0.3		
Plana (0.3% - 0.4%)	0.2		
	0.15		
Algo plana (1% - 2%)	0.1		
Promedio (2% - 7%)	0.06		
Fuerte (mayor de 7%)	0.06		
Componente de infiltración por cobertura			
Cobertura con zacate (menos de 50%)	0.09		
Terreno cultivado	0.1		
Cobertura con pastizal	0.18		
Bosques	0.2		
Cobertura con zacate (más del 75%)	0.21		

Figura 7. Hoja de ingreso de determinación de información edáfica

Esta es la hoja de ingreso de información edáfica y geomorfológica del sitio de interés. En ella se recogen datos de gran importancia para llevar a cabo un balance hídrico, siendo los más relevantes **la densidad aparente del suelo (g/cm³)**, **su profundidad (cm)**, **la pendiente de la parcela y el tipo de cobertura vegetal**; así como sus propiedades hídricas, que son la **capacidad de campo (%w)** y **el punto de marchitez**

permanente (%w), su infiltración base (mm/día) y la humedad que el suelo tiene almacenada al momento de la medición (%w).

Cabe mencionar que el valor de profundidad de suelo se utiliza en estudios puramente edáficos, puesto que, si se deseara realizar un balance hídrico agrícola, fuese necesario tomar en cuenta la profundidad de raíz de los cultivos.

También se recoge información complementaria que, aunque no necesaria para la ejecución de los balances, sí permite determinar el ambiente dentro del cual se desarrollan las condiciones edáficas que influyen en los resultados a obtener, pudiendo hacer razonamientos pertinentes al estudio que se desee realizar, a través de la relación entre dichas variables y su entorno. Esta consiste en **la ubicación geográfica del sitio de interés y la textura del suelo.**

Hoja de datos climáticos:

Ingreso y Determinación de Información Climática

Controles de generación de tabla para ingreso de datos climáticos diarios

Mes de 31 días

Mes de 30 días

Febrero

Febrero (Año bisiesto)

Borrar

Nota: Antes de generar nuevas tablas, se debe borrar las anteriores para evitar que éstas se sobrescriban.

Ingreso de Datos Climáticos

Estación Climatológica	Fecha		Año			
	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Mes	Tprom	ETP	PP (mm)
1				0.000	0.000	
2				0.000	0.000	

Radiación Solar Extraterrestre (mm/día) a 14° de Latitud Norte (Allen)

Mes	R0
Enero	12.2
Febrero	13.5
Marzo	14.7
Abril	15.6
Mayo	15.7
Junio	15.6
Julio	15.6
Agosto	15.5
Septiembre	15
Octubre	13.8
Noviembre	12.5
Diciembre	11.8
R0 correspondiente al mes actual	

Figura 8. Hoja de ingreso y determinación de información climática

En esta hoja se ingresa la información climática, específicamente **las temperaturas máxima y mínima diarias y la precipitación diaria** correspondientes al mes del cual se desee realizar el balance hídrico; pudiendo utilizarse los datos de la estación que sea más representativa para nuestro sitio de interés o, en caso de estar disponibles, datos específicos a dicha localidad.

El libro de cálculo ha sido diseñado para funcionar bajo las condiciones climáticas presentes en El Salvador; por lo que, la hoja calcula la ETP a través de la fórmula simplificada de Hargreaves (Sánchez San Román s.f.).

Esta hoja es importante para el funcionamiento de las *hojas de procesamiento*, dado que es en ella donde se determina el mes a trabajar y, por ende, su duración en días. Esta hoja cuenta con una función especial de generación de tablas, cuyo número de filas varía acorde a los días del mes en estudio y también modifica el tamaño de las tablas en las hojas siguientes, puesto que, como los cálculos se realizan en base diaria, no es viable establecer una tabla de tamaño fijo, debido a la distinta cantidad de días en cada mes.

Hoja de datos de cultivo:

Base de Datos de Cultivos Comunes				
Los presentes datos de cultivo se han tomado de la base de datos del programa informático Cropwat 8.0 y de la publicación n° 56 de la FAO, "Evapotranspiración del cultivo"				
Personalizado				
Cultivo	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Etapa				
Inicial	1			
Desarrollo	2			
Mediados	3			
Maduraci3n	4			
Cosecha	5			
Maíz				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	0.3	30	
Desarrollo	2	0.75	65	
Mediados	3	1.2	100	
Maduraci3n	4	0.78	100	
Cosecha	5	0.35	100	
Frijol				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	0.4	30	
Desarrollo	2	0.78	60	
Mediados	3	1.15	90	
Maduraci3n	4	0.75	90	
Cosecha	5	0.35	90	
Arroz (en seco)				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	0.5	10	
Desarrollo	2	0.55	35	
Mediados	3	1.05	60	
Maduraci3n	4	0.88	60	
Cosecha	5	0.7	60	
Arroz (en húmedo)				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	1.1	10	
Desarrollo	2	1.15	35	
Mediados	3	1.2	60	
Maduraci3n	4	1.13	60	
Cosecha	5	1.05	60	
Sorgo				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	0.3	30	
Desarrollo	2	0.65	85	
Mediados	3	1	140	
Maduraci3n	4	0.78	140	
Cosecha	5	0.55	140	
Musáceas (Año 1)				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	0.5	30	
Desarrollo	2	0.8	60	
Mediados	3	1.1	90	
Maduraci3n	4	1.05	90	
Cosecha	5	1	90	
Musáceas (Año 2)				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	1	90	
Desarrollo	2	1.1	90	
Mediados	3	1.2	90	
Maduraci3n	4	1.15	90	
Cosecha	5	1.1	90	
Cítricos				
Etapa	N° correlativ o etapa	Kc	Prof. Raíz (cm)	
Inicial	1	0.7	140	
Desarrollo	2	0.68	140	
Mediados	3	0.65	140	
Maduraci3n	4	0.68	140	
Cosecha	5	0.7	140	

Figura 9. Hoja de datos de cultivos comunes

En esta hoja se presenta información de varios cultivos de interés agrícola en El Salvador, siendo estos: maíz, frijol, arroz en seco y en húmedo, sorgo, musáceas en su primer y segundo año, cítricos, caña de azúcar, café y mango. De cada uno se presenta su ciclo productivo, dividido en 5 etapas anuales, enumeradas de forma correlativa de 1 a 5. A cada etapa le corresponde un valor de "Coeficiente de cultivo" (Kc) y de profundidad de raíz (cm).

Estas tablas se han realizado tomando, como fuente, la base de datos del programa informático Cropwat 8.0 de la FAO y la publicación n° 56 de la FAO, titulada "Evapotranspiración del Cultivo".

Aunque se cubre la mayoría de los cultivos de granos básicos del país, así como algunos cultivos frutales y comerciales, cabe la posibilidad que el usuario necesite elaborar un balance hídrico para otras especies

agrícolas, para otro tipo de plantas o, incluso, pueda que la información base ofrecida no se adapte a sus necesidades. Ante dicha situación, la hoja cuenta con una **tabla personalizable**, donde pueden introducirse los valores de Kc o profundidad de raíz que el usuario considere más apegados al ciclo de desarrollo de la especie vegetal de interés.

- **Hojas de procesamiento**

Las hojas de procesamiento son aquellas que llevan a cabo la computación de los balances hídricos, desde la determinación de la infiltración, hasta la presentación de los resultados de forma gráfica. Estas hojas requieren de poca o nula introducción de datos para funcionar, dado que recogen toda la información necesaria de las hojas de referencia. Éstas se encuentran clasificadas de la siguiente manera:

Hoja de infiltración y escorrentía:

<i>Infiltración y Escorrentía Diaria</i>										
Municipio	sin entrada	Coordenadas		Estación climatológica asociada	sin entrada			Mes	Año	
Cantón	sin entrada	Latitud	sin entrada		sin entrada	sin entrada		sin entrada	sin entrada	
Caseario	sin entrada	Longitud	sin entrada							
Día	PP (mm)	Ret (mm)	Kib	Kp	Kv	Ci	Pi (mm)	Esc (mm)		
1	0	0.00	0.00	0.3	0.21	0.510	0.000	0.000		
2	0	0.00	0.00	0.3	0.21	0.510	0.000	0.000		

Figura 10. Hoja de datos de infiltración y escorrentía diaria

En esta hoja se determina el denominado “componente de Schosinsky & Losilla” para los modelos que lo tienen incorporado. Se realiza el cálculo del **coeficiente de infiltración** y la **precipitación infiltrada**; y también se determina la **escorrentía**.

Puede observarse en la figura 8 que la tabla únicamente cuenta con dos filas de datos. Esto es porque todavía no se han generado el resto de las filas. Ésta es la primera tabla que depende del mecanismo de generación de tablas presente en la *hoja de datos climáticos*, el cual permite cambiar el número de filas acorde a los días del mes en que se esté trabajando.

Hojas de fichas hídricas:

Municipio	sin entrada	Coordenadas		Estación climatológica asociada	sin entrada	Mes	Año	¡Dato importante!
Cantón	sin entrada	Latitud	sin entrada			sin entrada	sin entrada	
Casero	sin entrada	Longitud	sin entrada	Humedad inicial del presente mes (%w)	Nota: Antes de generar nuevas fichas, se debe borrar las anteriores para evitar que éstas se sobrescriban.			
Ajustes relativos al cultivo y modelo de balance hídrico		Selección de cultivo						
		No cultivo						

Década 1	Etapa del Cultivo	0	CC (mm)	PMP (mm)	Lámina útil (mm)	Lámina inicial (mm)
			0.000	0.000	0.000	0.000

Fecha	Pi (mm)	Esc (mm)	ETP (mm)	Kc	ETC (mm)	ST _{t-1} (mm)	C1	C2	ETPR (mm)	HD (mm)	HD (%)	ETR	STI (mm)	R (mm)
1	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#DIV/0!	0.000	0.000

Figura 11. Encabezado en hoja de ficha hídrica

Estas son las hojas principales del libro de cálculo. En ellas, se lleva a cabo la computación de los procesos que reconocemos como correspondientes a un balance hídrico. Cada hoja se encuentra diseñada para trabajar según cada uno de los modelos propuestos, produciendo sus propios resultados por separado.

En cada una de ellas, hay un encabezado en el que se muestra información complementaria y se encuentra una barra de menú desplegable que permite seleccionar el cultivo para el cual se realizará el balance. También, cuenta con una entrada condicional de datos, correspondiente a la **humedad inicial del suelo al principio del mes**, en la que los resultados de cada modelo son reintroducidos para dar continuidad al proceso a lo largo del período de duración del estudio; siendo ésta prioritaria a la entrada en la *hoja de datos edáficos*.

Las fichas hídricas se encuentran separadas en tres, representando a cada década del mes; las cuales cuentan con su propio sub encabezado, dentro de los cuales, se **determina la etapa** en la que se estima se encontraría el cultivo durante dicha década. Esto permite establecer cuál sería la profundidad efectiva con la que se trabajaría y, por lo tanto, serviría para calcular las láminas correspondientes a la CC y el PMP a partir de sus porcentajes volumétricos correspondientes, la lámina útil y la lámina inicial a partir de los datos de porcentaje gravimétrico de humedad introducidos.

Al inicio de las décadas 2 y 3, en el sub encabezado se realiza un cálculo regresivo de lámina a porcentaje gravimétrico, sobre el dato de lámina total del último día de la década anterior. Esto se hace debido a que, al progresar el cultivo en sus etapas, las raíces crecen y, por ende, la profundidad efectiva aumenta; significando que la planta ahora cuenta con una mayor cantidad de agua disponible, la cual, ya no se encuentra comprendida dentro del último dato de lámina total producido. El cálculo regresivo permite

convertir un dato de lámina puntual a una proporción, la cual es extrapolable a las nuevas profundidades a tomar en cuenta en el perfil. Esto se hace bajo la asunción de que, *debajo de la profundidad a la que las raíces extraen agua, el suelo siempre estará a capacidad de campo*, debido a que esta humedad no se encuentra al alcance y, por ende, no se consume, tal y como lo sugieren Thornthwaite & Mather (1955) y explícitamente lo propone Schosinsky (2006) en su trabajo.

Década 3		Etapa del Cultivo		0		CC (mm)	PMP (mm)	Lámina útil (mm)	Humedad inicial (%w)	Lámina inicial (mm)
						0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fecha	Pi (mm)	Esc (mm)	ETP (mm)	Kc	ETC (mm)	ST _{t-1} (mm)	C1	C2	ETPR (mm)	HD (mm)	HD (%)	ETR	STi (mm)	R (mm)
21	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#iDIV/0i	0.000	0.000	0.000
22	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	#iDIV/0i	0.000	0.000	0.000

Resumen de resultados del mes		
	ST final (mm)	Humedad final (%w)
Década 1	0.000	0.000
Década 2	0.000	0.000
Década 3		

Ir a Portada	Ir a Datos Edáficos	Ir a Datos Climáticos	Ir a Datos de Cultivo	Ir a Infiltración y Escorrentía	Ir a Comportamiento de Variables
Ir a Modelo Schosinsky-FL	Ir a Modelo T&M(A)	Ir a Modelo T&M-FL	Ir a Modelo Scho-T&M(A)	Ir a Modelo Scho-T&M-FL	

Figura 12. Pie de hoja de ficha hídrica

Dentro las fichas hídricas generadas, la ficha correspondiente a la década 3 cuenta únicamente con dos filas. Esto es porque se encuentra sujeta a modificación a través de la generación automática de tablas controlada en la *hoja de datos climáticos*; puesto que esta década es la única de duración variable dentro del mes.

Al pie de la hoja, en su esquina inferior izquierda, se encuentra una tabla resumen que muestra el último valor de humedad estimado para cada década. Es en esta tabla donde se consultará el porcentaje de humedad gravimétrica final a ser utilizado como valor inicial para el mes próximo.

Hoja de comportamiento de variables:

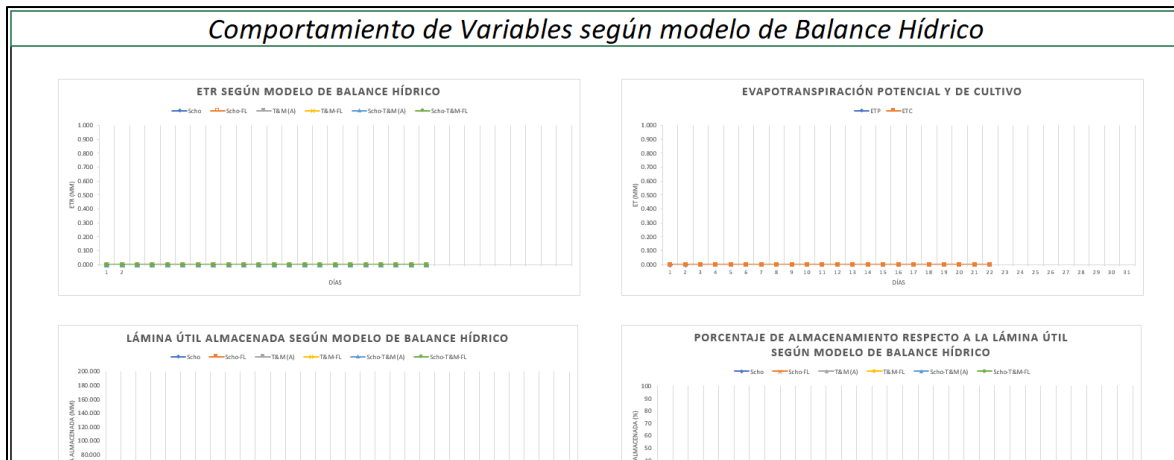


Figura 13. Hoja de comportamiento de variables según modelo de balance hídrico

En esta hoja se presentan gráficos comparativos de los resultados producidos por cada modelo de balance hídrico. Las variables presentadas son **la ETr según modelo, la ETp y ETC, la lámina útil almacenada según modelo y su porcentaje respecto a su valor total, la lámina evaporable almacenada y su porcentaje respecto a su valor total; y la precipitación bruta y precipitación infiltrada según Schosinsky & Losilla.**

La diferencia entre las variables **lámina útil** y **lamina evaporable** se encuentra en el hecho que, para los modelos que utilizan el componente de almacenamiento de Forte Lay, ambos valores representan un tipo de humedad distinta. Tal y como se explicó anteriormente, la lámina útil se encuentra dentro de los límites definidos por la CC y el PMP (comprende únicamente el agua capilar disponible o agua útil); mientras que, la lámina evaporable es aquella cuyos valores fluctúan entre la CC y el ELD (agua capilar disponible y no disponible). En los modelos que utilizan el componente de Botey et al., no existe diferencia entre estas dos láminas, pues, para ambas, el PMP representa el límite de desecación.

7.1.3.2. elaboración de manual de usuario para libro de cálculo. Se ha elaborado un manual de usuario para volver accesible el libro de cálculo a cualquier persona que desee utilizarlo como herramienta para el estudio y manejo de la humedad del suelo. Éste se encuentra estructurado de tal manera que permite conocer al usuario el respaldo teórico que hay detrás de los principios que rigen el comportamiento del agua dentro del medio edáfico, así como también, comprender los modelos en los que están basadas las propuestas de balance hídrico. Posteriormente, se explican las propuestas en sí mismas y la manera en que se encuentran estructuradas; el funcionamiento del libro de cálculo y la determinación de las características de cada modelo propuesto. Finalmente, se ofrecen recomendaciones

respecto al modelo más adecuado para su uso inmediato y, también, sobre aspectos a tener en cuenta al momento de llevar a cabo una investigación de campo que permita determinar más precisamente el modelo adecuado.

También contiene un conjunto de anexos donde se encuentran detallados los cálculos efectuados en el libro y los resultados de las pruebas ejecutadas para determinar las características de cada modelo propuesto.

Para acceder al manual de usuario, ver anexo 5.

7.1.3.3. caracterización de los modelos y selección de la propuesta a ser utilizada por la DOA.

- **características generales de los modelos propuestos.** A través de las pruebas, se ha identificado que, factores como la ocurrencia de precipitaciones y su intensidad, la infiltración, la demanda hídrica de la atmósfera y el cultivo (según su etapa o si hay cultivos presentes o no), así como la cantidad de humedad misma disponible en el suelo, influyen en la tasa de desecación que estiman todos los modelos en general.

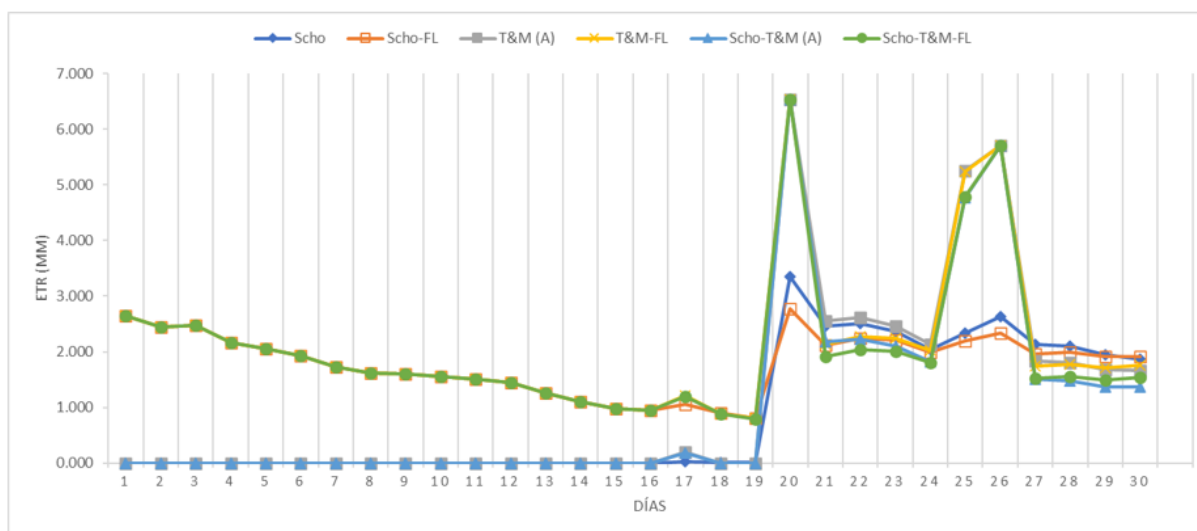


Figura 14. Evapotranspiración real, abril 2022. Prueba en condiciones estándar, sin cultivo

Como **primer aspecto general** dentro del comportamiento de los modelos, encontramos que, si el suelo no cuenta con una lámina húmeda *por encima de su límite de desecación*, entonces no habrá ETr, puesto que no hay humedad que pueda ser evaporada y absorbida por la atmósfera. Esto se ve reflejado en las gráficas de los modelos de Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), entre el 1 y 19 de abril, en la figura 14. Los

otros tres modelos presentan ETr dentro de estas mismas fechas por el hecho que toman en consideración la posibilidad de haber agotamiento de lámina por debajo del PMP, que es el nivel de humedad que se ha tomado como punto de partida para realizar la prueba.

El aumento de evaporación aislado que se observa en el día 17 se debe a la ocurrencia de precipitaciones, tal y como se aprecia en la figura 15.

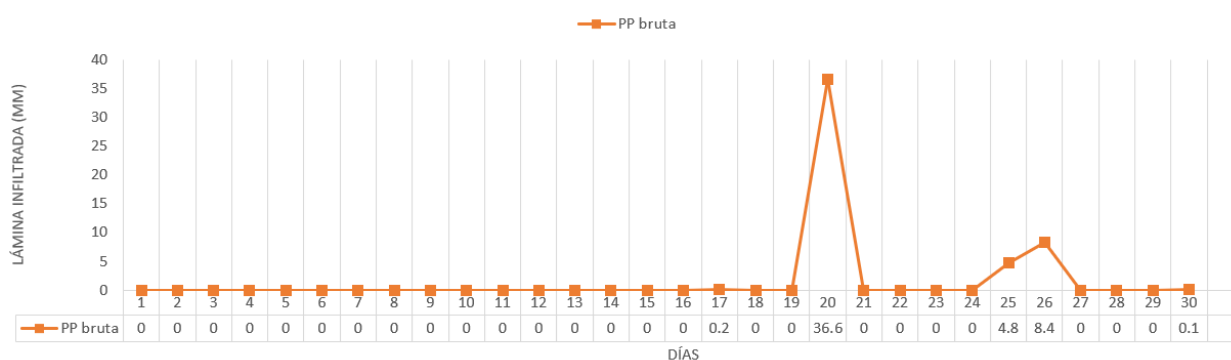


Figura 15. Precipitación infiltrada, abril 2022. Prueba en condiciones estándar, sin cultivo

Como **segundo aspecto general**, variaciones en la ETp/ETc pueden alterar la evapotranspiración que estima cada modelo. Si ocurre un aumento en la demanda atmosférica, también provocará un incremento en la ETr; e, igualmente, si ocurre una reducción, la ETr será baja. Esto puede apreciarse entre los días 21 a 24 de abril, en la figura 14, donde todos los modelos reflejan un incremento y reducción de magnitudes similares. Esto se ve influido por el comportamiento de la ETp en esos días, como puede observarse en la gráfica de la figura 16.

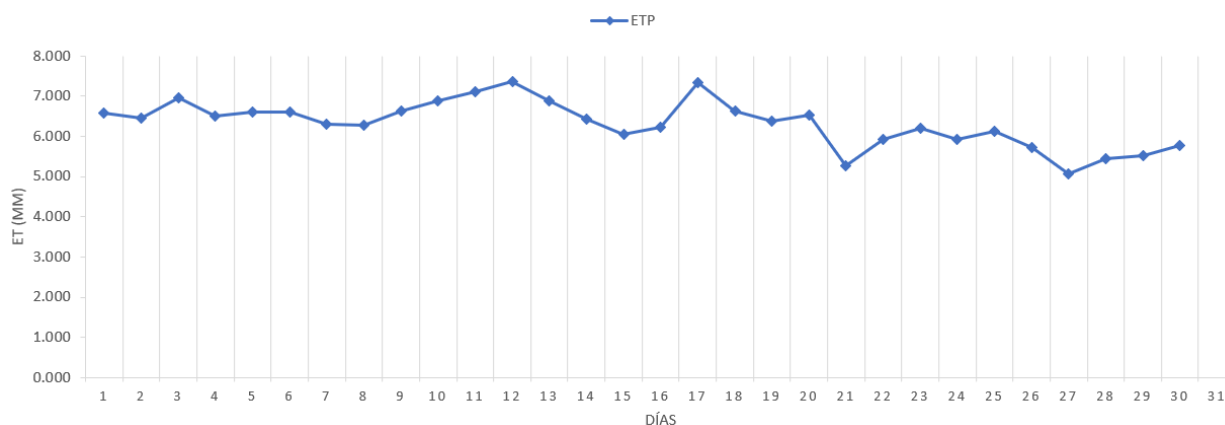


Figura 16. Evapotranspiración potencial, abril 2022

Como **tercer aspecto**, conforme el suelo alcanza niveles de humedad cercanos a su límite, la evaporación se vuelve más lenta, debido a la retención de humedad ejercida por las partículas del suelo. Esta ralentización puede verse en la gráfica de los modelos Scho-FL, T&M-FL y Scho-T&M-FL, desde el 1 al 19 de abril; pero, especialmente, en todos los modelos, entre los días 27 a 30.

Esto puede parecer contraintuitivo, tomando en cuenta lo mencionado anteriormente respecto a la influencia de la ETp, que presenta incrementos en los periodos considerados. Sin embargo, si observamos la figura 17, podemos ver que, para los días observados, la lámina hídrica se agota constantemente, lo que dificulta la evaporación, explicando el comportamiento de la ETr.

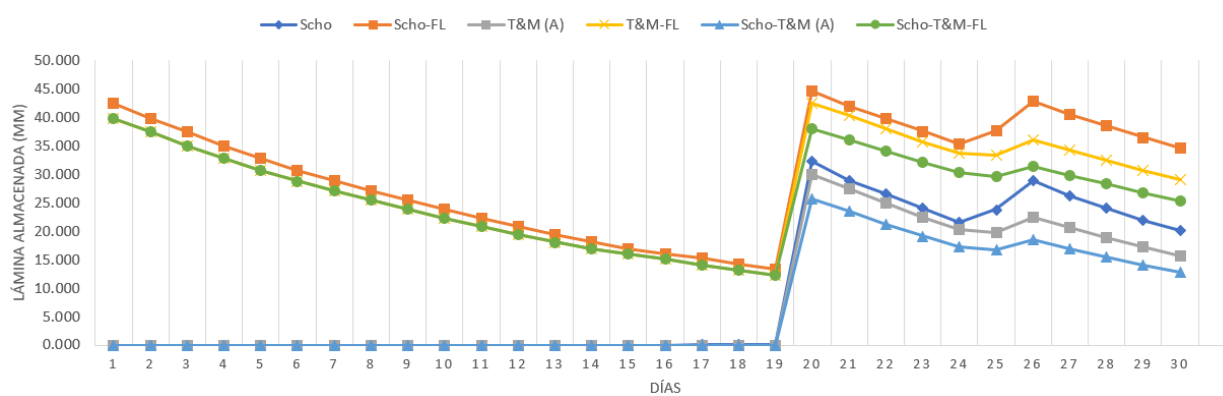


Figura 17. Lámina hídrica almacenada según modelo, abril 2022

Finalmente, como **cuarto aspecto general** identificado, cuando se presentan condiciones de abundancia hídrica (lluvias sostenidas, lámina húmeda suficiente y/o baja demanda hídrica), la ETr tiende a comportarse de manera bastante uniforme a lo largo de los días. Cuando se presentan condiciones de escasez relativa (lluvias esporádicas, lámina húmeda reducida o en proceso de consumo y/o alta demanda hídrica), la ETr tiende a aumentar de forma abrupta ante la ocurrencia de precipitaciones. Mientras más seco se encuentre el suelo, más abruptos serán dichos aumentos de ETr.

Esto se ve reflejado en las figuras siguientes, que muestran el comportamiento de la ETr y la humedad del suelo en condiciones estándar y con un cultivo de maíz establecido. Entre los días 1 a 10, cuando el cultivo se encuentra en su etapa de desarrollo vegetativo, la demanda hídrica es relativamente baja (figura 18), lo cual, junto con una infiltración abundante (figura 21) y una lámina húmeda suficiente (figura 20), deriva en una ETr sostenida a lo largo del período.

A partir del día 11, cuando el cultivo alcanza su etapa de floración, la demanda hídrica del cultivo aumenta en gran medida, superando incluso a la ETp (figura 19), lo que deriva en un agotamiento más acelerado

de la humedad del suelo. Esto, junto con el hecho que entramos a un período relativamente más seco (figura 21), resulta en una temporada de escasez hídrica, comparada con los diez días anteriores. En la figura 18, podemos observar que el comportamiento de la ETr es mucho menos regular, presentando aumentos y caídas abruptas, siendo mucho más dramático para algunos modelos. Los días en que los picos evaporativos se presentan coinciden con la ocurrencia de precipitaciones, lo que deriva en una mayor disponibilidad de agua para consumo de la planta.

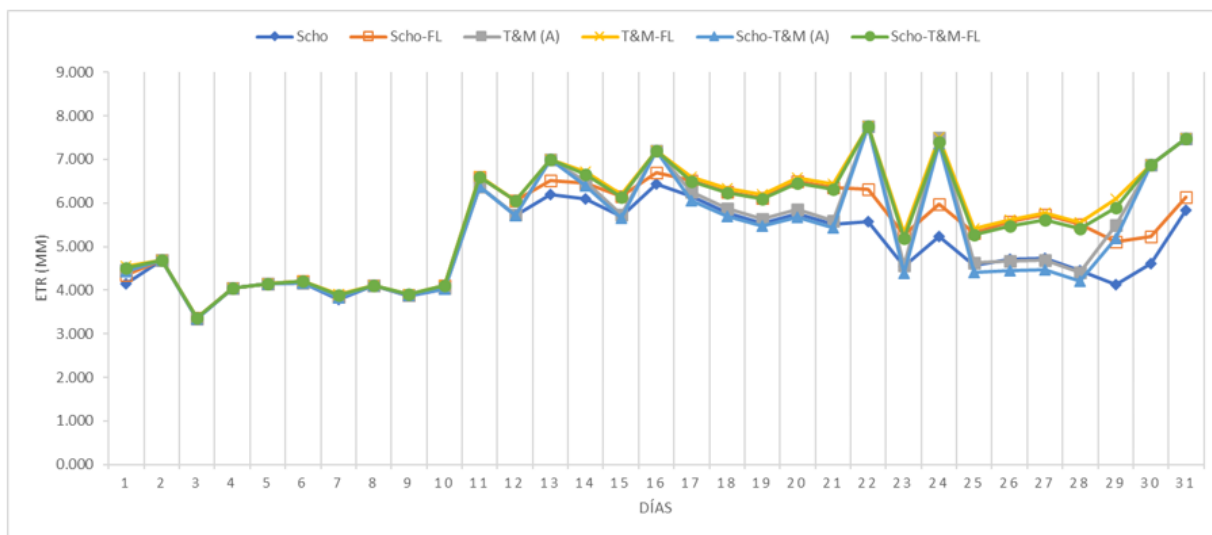


Figura 18. Evapotranspiración real, julio 2022. Prueba en condiciones estándar, cultivo de maíz

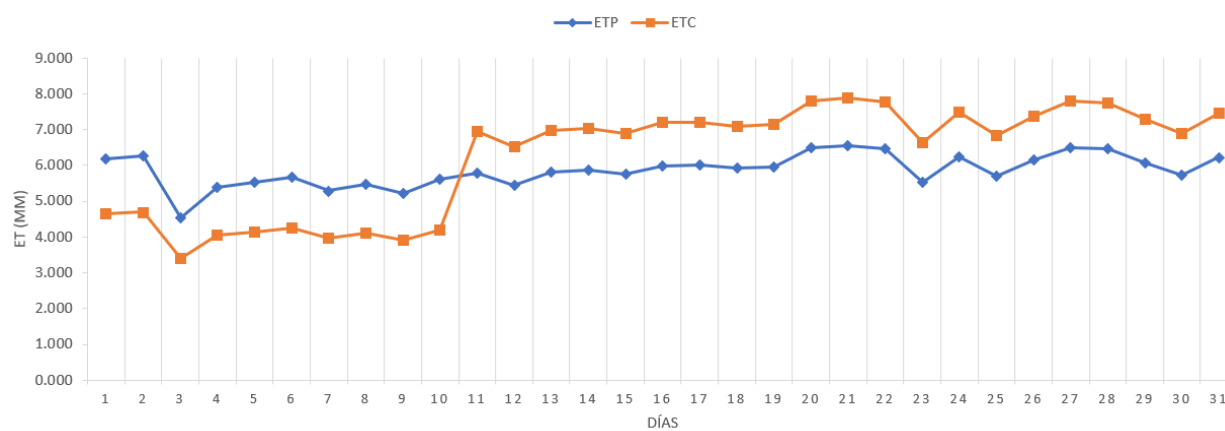


Figura 19. Evapotranspiración potencial y evapotranspiración del cultivo de maíz, en etapa de desarrollo y floración; julio 2022

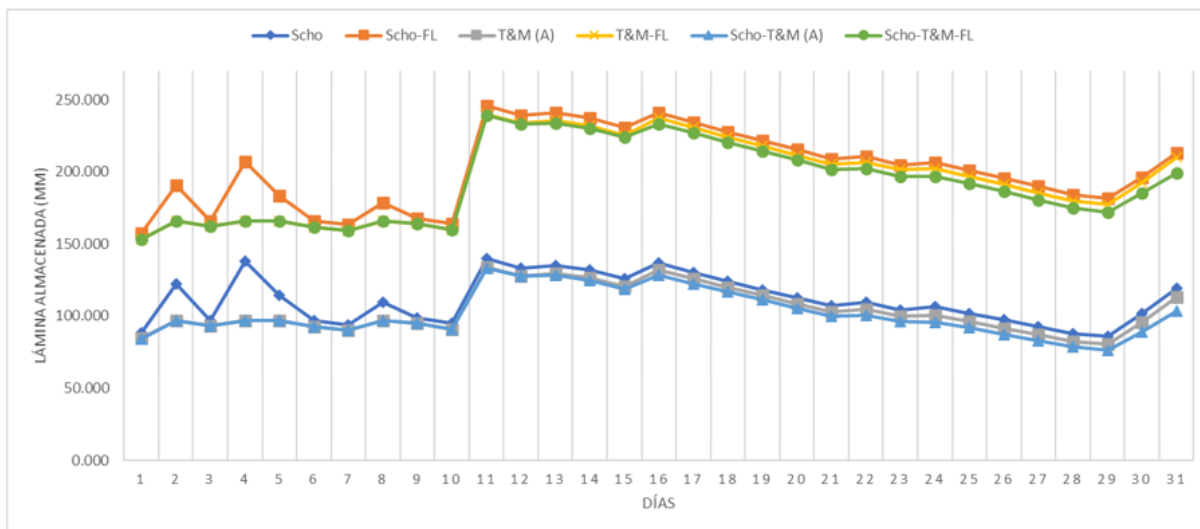


Figura 20. Lámina hídrica almacenada según modelo, julio 2022. Prueba en condiciones estándar, cultivo de maíz

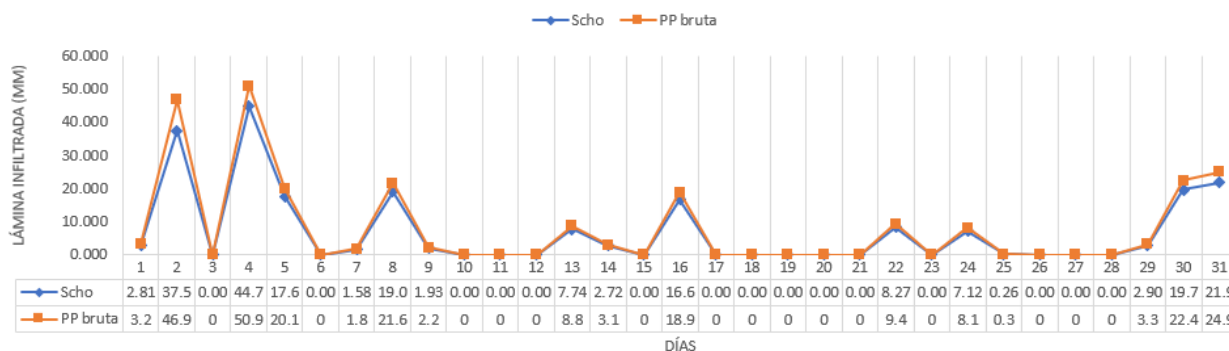


Figura 21. Precipitación incorporada al suelo según modelo de infiltración, julio 2022

Cabe mencionar que, el aumento evaporativo ocurrido entre el día 10 y 11, en la figura 18, se debe a una limitante técnica del libro de cálculo. Debido a que se asigna una etapa de cultivo por cada década (10 días), con un valor de Kc intrínseco, el programa asigna el cambio de etapa de manera inmediata y no gradual, como ocurriría en la naturaleza, resultando en tal comportamiento anómalo.

La lámina hídrica almacenada también presenta un aumento de la misma naturaleza, cuya ocurrencia reside en la misma causa. Cada etapa tiene una profundidad de raíz fija asignada y, conforme la raíz profundiza más en el perfil del suelo, tiene acceso a una mayor cantidad de agua; por lo que, junto con el cambio de etapa, también aumenta la lámina húmeda disponible. Esto responde a la asunción que, por

debajo de donde las raíces extraen el agua, el suelo permanece en CC, tal como se menciona en este capítulo.

- **modelo de Schosinsky.** El componente de infiltración de S&L determina cuánta agua infiltra según las características del terreno, por lo que los ingresos de humedad siempre serán menores a la PP (figura 22). Esto lleva a que la lámina hídrica disponible sea menor en la mayoría de los casos, como puede observarse en la figura 23, entre los días 20 a 24; donde los modelos Scho y Scho-T&M (A) muestran tener menos humedad disponible que T&M (A), que asume que toda la PP ingresa al suelo.

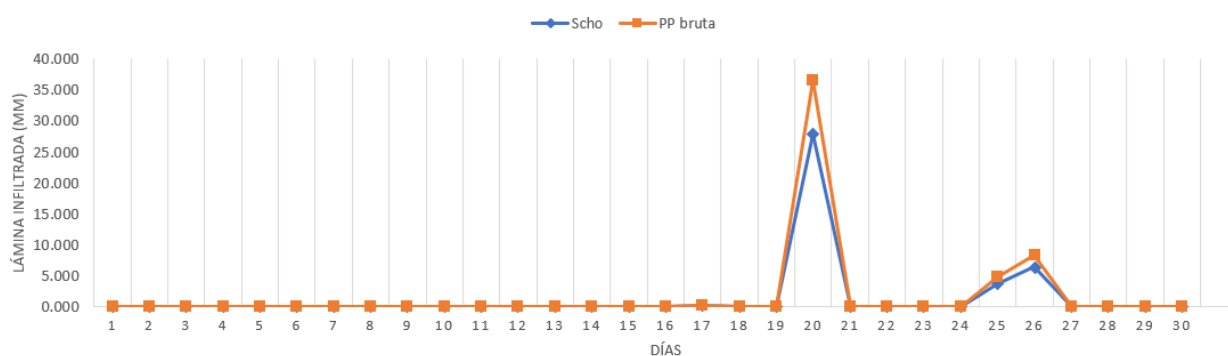


Figura 22. Precipitación bruta infiltrada e infiltración según S&L, abril 2022. Prueba en condiciones reales

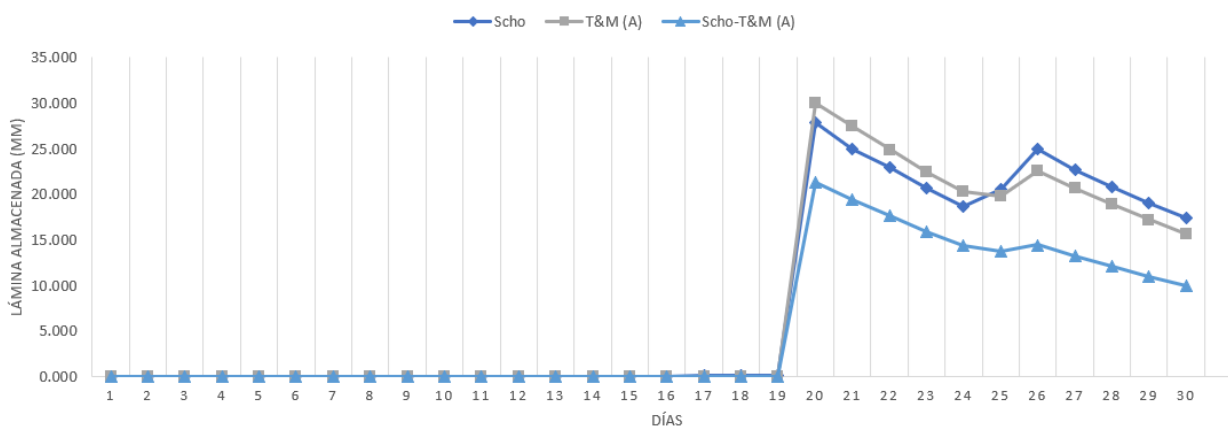


Figura 23. Lámina útil almacenada según modelos Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales

Luego, para la determinación de la ETr, el componente de comportamiento de lámina de Schosinsky estima que *la infiltración ocurre previamente a la ET*, por lo que primero se adiciona la humedad infiltrada a la reserva de agua ya existente en el suelo, estableciendo una reserva total al final del día. Sobre este

valor, se calcula la ETr, que luego es sustraída de esta misma reserva. En otras palabras, el modelo de Schosinsky se ejecuta como si los ingresos ocurriesen al inicio del día y los egresos al final.

Esta forma de determinar la evaporación resulta en estimaciones de reserva hídrica más optimistas para un día dado, en comparación a los modelos que utilizan el componente de T&M, como puede observarse en la figura 23, si comparamos a Scho con Scho-T&M (A).

Si recordamos, en temporadas de escasez hídrica, las precipitaciones provocan picos evaporativos. Para el caso del componente de comportamiento de lámina de Schosinsky, estos son comparativamente más discretos, como puede observarse en la figura 24. Esto se debe a que, como el modelo permite la infiltración de la humedad previo a su evaporación, entra en efecto la retención que las partículas del suelo ejercen sobre el agua.

Es posible apreciar, en la misma gráfica que, la ET estimada por Scho se mantiene más elevada que la de T&M para los días no lluviosos. Esto responde al mismo motivo de la retención de la humedad por el suelo. Si observamos en la figura 23, la lámina húmeda de Scho, permanece más abundante que la que presenta Scho-T&M (A), por lo que la retención es menor sobre el primero. El motivo por el cual éste último modelo (que utiliza el componente de T&M) evapora más en los días lluviosos; pero menos en los días áridos, se aborda más adelante.

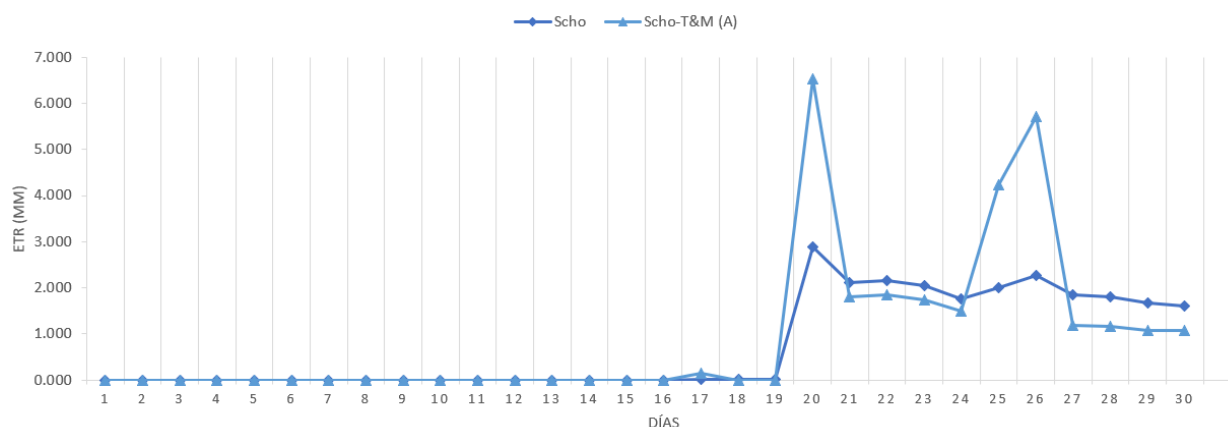


Figura 24. Evapotranspiración real según modelos Scho y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales

Cabe mencionar que, según el método de Schosinsky, la reserva hídrica sobre la que se sustrae la ETr toma en cuenta el agua gravitacional, por lo que la humedad disponible puede llegar a superar la CC para un día dado. En otras palabras, se considera que *la percolación ocurre después de haberse sustraído la ETr a*

la reserva total. Esto puede corroborarse en la figura 25. Para un suelo cuya capacidad máxima de almacenamiento de agua útil es de 148 mm, vemos cómo la gráfica de Scho alcanza un valor de 191 mm en el día 13, para luego reducirse abruptamente en los días siguientes; mientras que la gráfica de Scho-T&M (A) se mantiene estable, sin superar la CC del suelo.

Si observamos la figura 26, podemos corroborar que el exceso que manifiesta Scho coincide con la ocurrencia de una precipitación abundante en el mismo día.

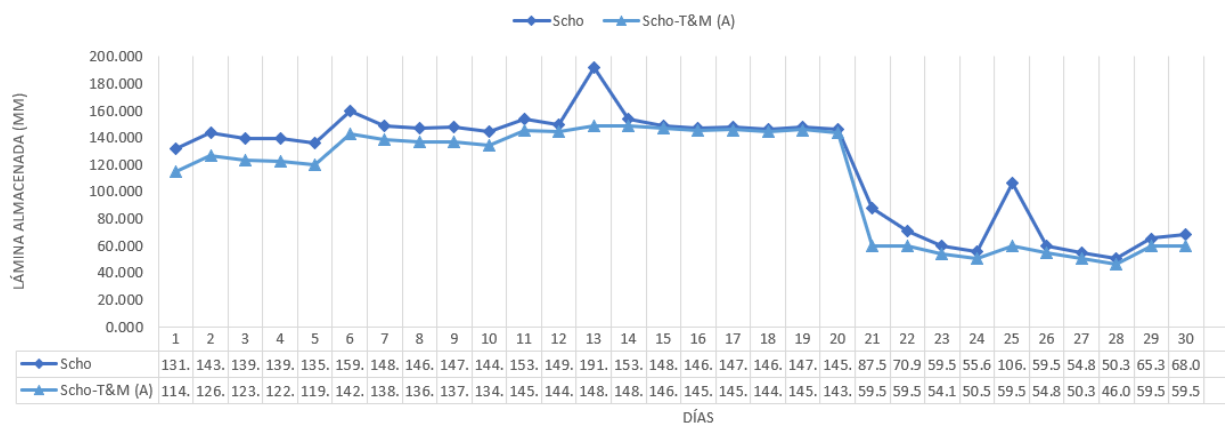


Figura 25. Lámina útil almacenada según modelos Scho y Scho T&M (A), septiembre 2022. Prueba en condiciones reales, cultivo de maíz

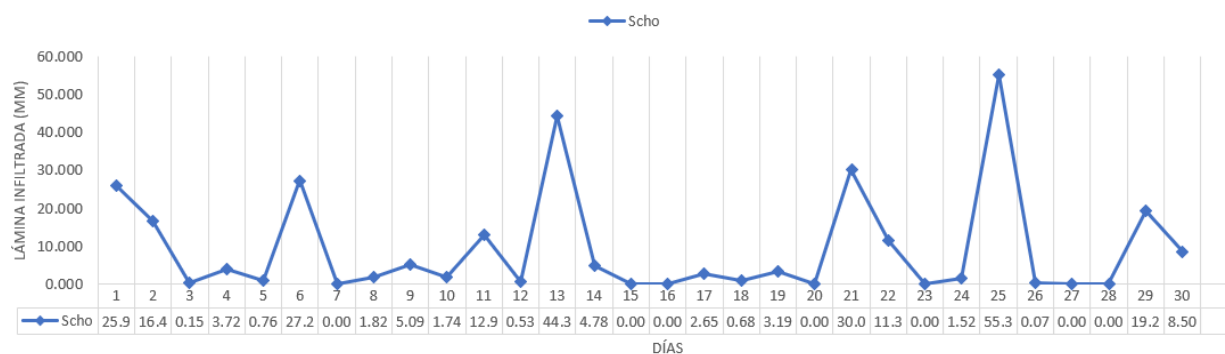


Figura 26. Precipitación infiltrada según S&L, septiembre 2022. Prueba en condiciones reales

Finalmente, debido al componente de capacidad de almacenamiento de Botey et al., la lámina evaporable varía entre la CC y el PMP. Se amplía sobre este aspecto más adelante.

- **modelo de Schosinsky-FL.** Este modelo utiliza el componente de infiltración S&L y el componente de comportamiento de lámina de Schosinsky tal y como se han discutido anteriormente. La diferencia está en el componente de capacidad de almacenamiento; siendo el de Forte Lay el utilizado por

el presente. Debido a ello, la reserva húmeda varía entre la CC y el ELD, lo que genera variaciones interesantes en el comportamiento de la reserva hídrica.

Lo primero que puede observarse en la figura 27 es que, mientras el modelo Scho empieza el mes con una reserva hídrica nula, Scho-FL sí cuenta con humedad disponible al inicio, lo que lleva a que se registre evapotranspiración por parte de este modelo (Figura 28). Esto se debe a que el ELD representa un nuevo límite de desecación en este componente de almacenamiento, por lo que todavía la atmósfera puede seguir extrayendo humedad, alcanzando el suelo niveles de desecación por debajo del PMP.

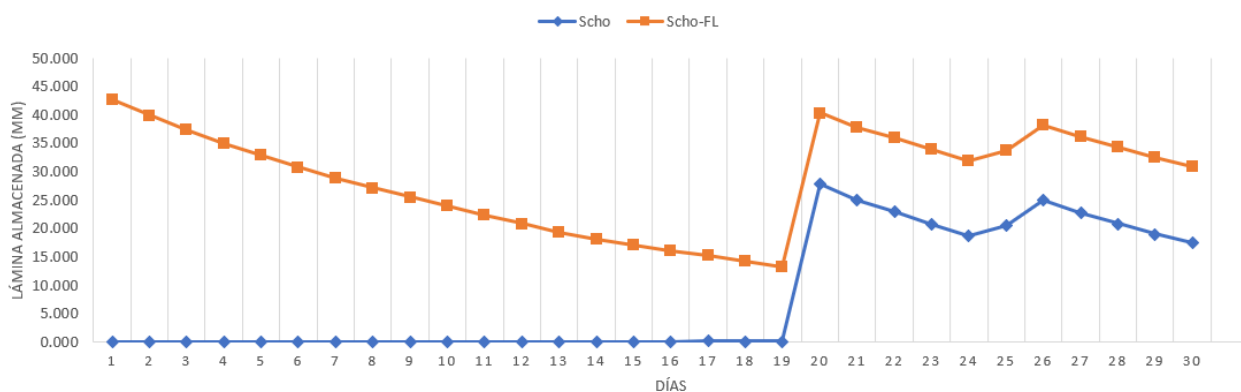


Figura 27. Lámina evaporable almacenada según modelos Scho y Scho-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

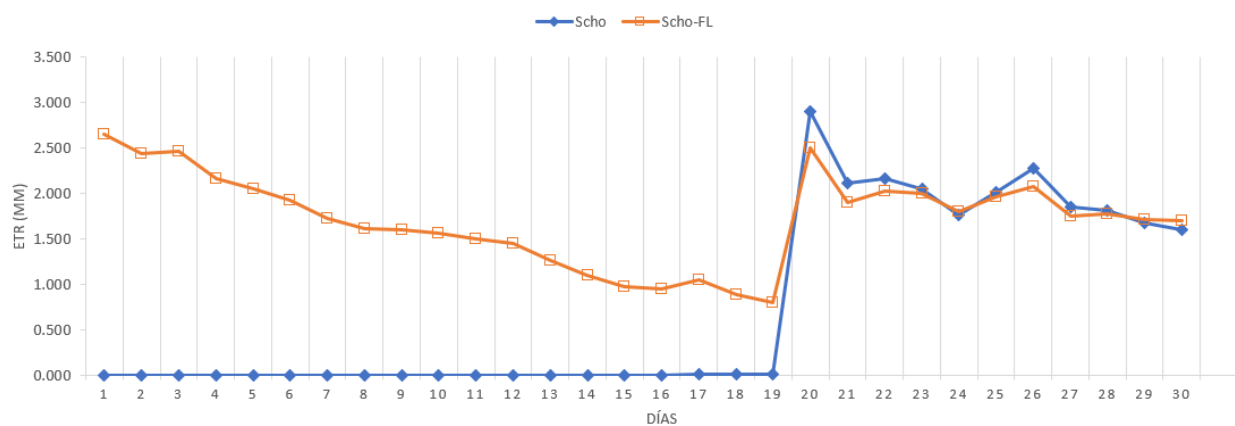


Figura 28. Evapotranspiración real según modelos Scho y Scho-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

Luego, a pesar de tener una mayor reserva hídrica, después de las primeras precipitaciones abundantes en el día 20 (Figura 22), podemos ver que la ETr que registra Scho-FL es un poco menor que la de Scho en algunos días. Esto se debe a la retención que ejerce el suelo sobre la humedad; lo que puede parecer

contraintuitivo; pero tiene una explicación. Si recordamos, conforme la reserva hídrica se agota y su nivel se acerca al límite de desecación, la fuerza de retención aumenta; y, en el caso de Scho-FL, ésta se vuelve mucho más fuerte al ir por debajo del PMP; por lo que la evaporación es más difícil en comparación a Scho.

Otra consideración que debemos tener es que, la humedad que se recibe por la lluvia, tardará más en abastecer el suelo según Scho-FL que según su contraparte; y esta agua que se reciba no podrá pasar a ser parte del agua útil inmediatamente, lo que influye en que la tasa evaporativa no llegue a equipararse inmediatamente. La figura 29 ilustra esta situación a la perfección, donde podemos observar que Scho-FL presenta valores negativos de lámina útil durante todo el mes.

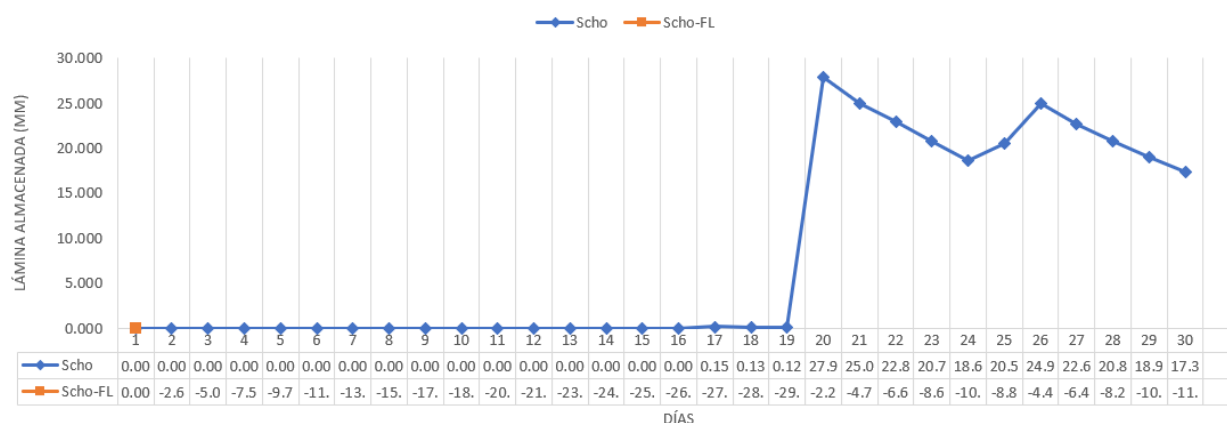


Figura 29. Lámina útil almacenada según modelos Scho y Scho-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

A pesar de lo mencionado, podemos ver que Scho llega a tener una ETr menor en los días 24, 29 y 30 de abril. Esto se debe a que Scho está comenzando a acercarse demasiado a su límite de desecación (PMP); por lo que *la tasa evaporativa tiende a variar más abruptamente conforme la humedad se reduce entre CC y PMP que entre CC y ELD.*

- modelo de T&M(A).** Este modelo utiliza el componente de infiltración de Thornthwaite; lo que, en otras palabras, significa que considera el valor bruto de la precipitación como ingreso de humedad al suelo (Figura 22). Esto influye principalmente en la disponibilidad hídrica para consumo (evapotranspiración). En ese sentido, podría considerarse un componente que realiza estimaciones optimistas respecto a su contraparte, el de S&L. Gracias a ello, la reserva hídrica es más abundante en los días 20 a 24 de abril (Figura 30).

El siguiente aspecto importante es la utilización del componente de comportamiento de lámina de T&M, que se introdujo brevemente en la comparación del modelo de Scho con el modelo de Scho-T&M (A). Este componente puede considerarse diametralmente opuesto a su contraparte, pues *estima que la ET ocurre previamente a la infiltración*. Esto lleva a la formación de picos evaporativos bastante abruptos en días de lluvia aislados (según la cantidad precipitada), dado que la humedad “no alcanza a ingresar al suelo” y, por lo tanto, no sufre el efecto de la retención del medio edáfico (según el funcionamiento del modelo), como puede observarse en los días 20, 25 y 26, en la figura 30.

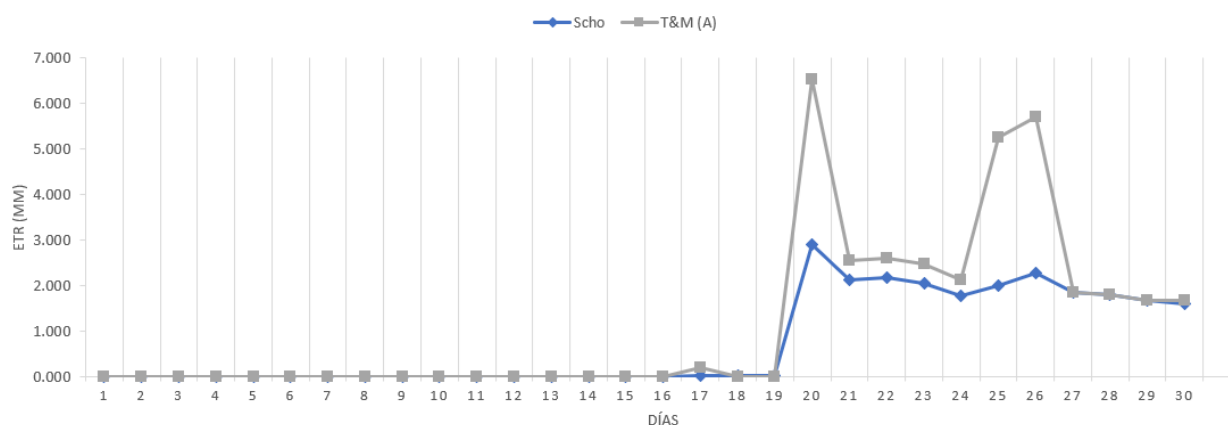


Figura 30. Evapotranspiración real según modelos Scho y T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales

Si la ET resulta ser menor que la infiltración, la humedad sobrante logra incorporarse a la reserva hídrica; y si, en días subsiguientes, no ocurren más precipitaciones, la ETr será comparativamente menor, debido a la retención del suelo, como puede observarse los días 21 a 24 y 27 a 29. Pero si la ET es mayor que el aporte hídrico de la lluvia, la humedad se evaporará antes de siquiera poder formar parte de la reserva del suelo, como ocurre el 17 de abril.

En caso en que la ET sea mayor que la PP; pero el suelo cuente con una reserva hídrica previa, la atmósfera “primero” absorberá el agua precipitada y, luego, el déficit resultante influirá en la desecación subsiguiente del suelo, cuya magnitud también dependerá del tamaño de la reserva presente, debido a la fuerza de retención. El comportamiento que ocurre el día 25 de abril, tanto de lámina almacenada (Figura 31), como de ETr se explica por este fenómeno descrito. A pesar que el aporte hídrico de la precipitación es mayor para T&M (A) que para Scho (Figura 22), la reserva hídrica acaba reduciéndose, debido a la ETr elevada para ese día (Figura 32), que no permite que ocurra infiltración y acaba provocando desecación.

A partir de este día, la lámina húmeda que registra este modelo acaba siendo menor para el resto del mes, en comparación con su contraparte.

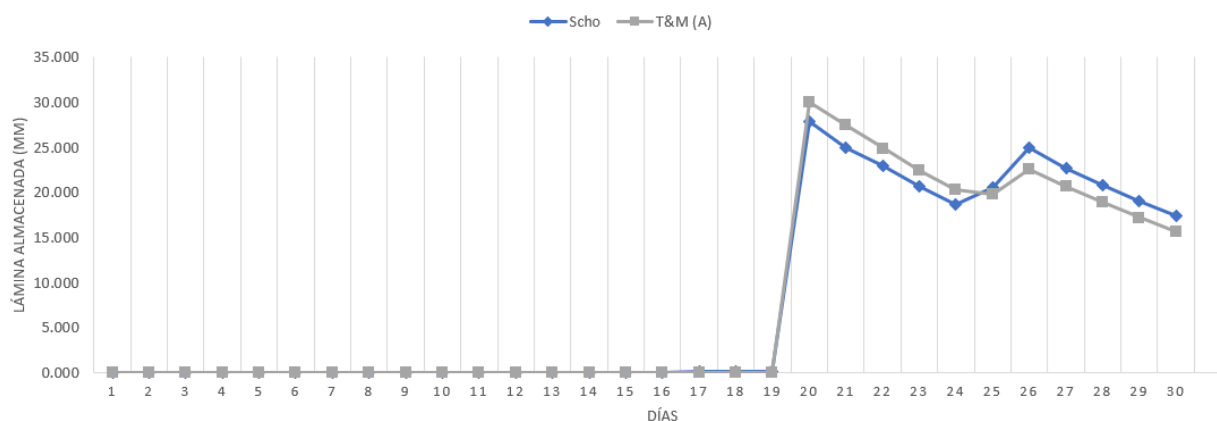


Figura 31. Lámina útil almacenada según modelos Scho y T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales

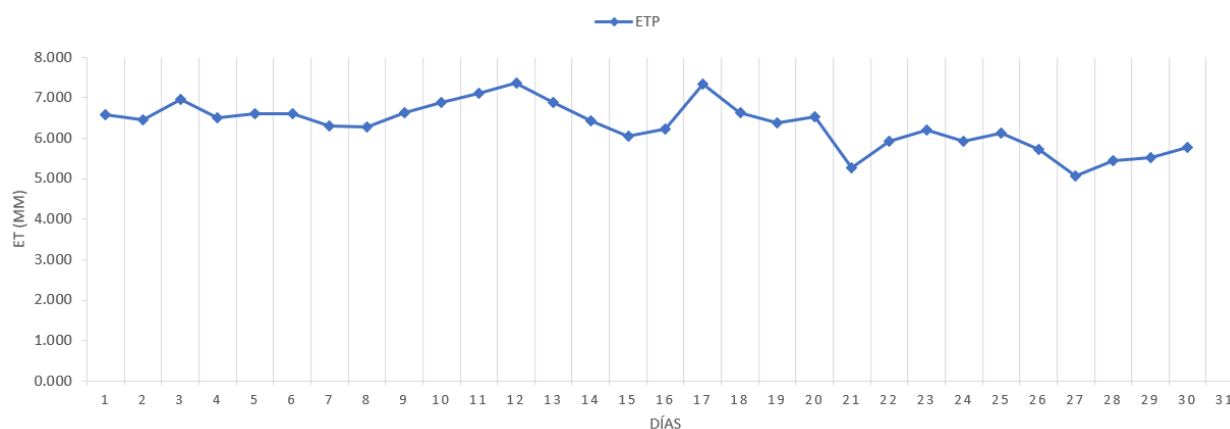


Figura 32. Evapotranspiración potencial según el método de Hargreaves, abril 2022

Luego de esta última afirmación, llama la atención que la ETr que presenta T&M (A) se equipare a la de Scho durante los días 27 a 30. Esto es porque el componente de T&M estima tasas evaporativas más elevadas que su contraparte.

Finalmente, como este modelo utiliza el componente de capacidad de almacenamiento de Botey et al., la lámina evaporable varía entre la CC y el PMP.

- **modelo de T&M-FL.** Este modelo utiliza el componente de infiltración de Thornthwaite y el componente de comportamiento de lámina de T&M tal y como se han discutido anteriormente. La

diferencia está en el componente de capacidad de almacenamiento; siendo el de Forte Lay el utilizado por el presente. Debido a ello, la reserva húmeda varía entre la CC y el ELD, lo que genera variaciones interesantes en el comportamiento de la reserva hídrica.

Lo primero que puede observarse en la figura 33 es que, mientras el modelo T&M (A) empieza el mes con una reserva hídrica nula, T&M-FL sí cuenta con humedad disponible al inicio, lo que lleva a que se registre evapotranspiración por parte de este modelo (Figura 34). Esto se debe a que el ELD, en este componente de almacenamiento, representa un nuevo límite de desecación, por lo que todavía la atmósfera puede seguir extrayendo humedad, alcanzando el suelo niveles de desecación por debajo del PMP.

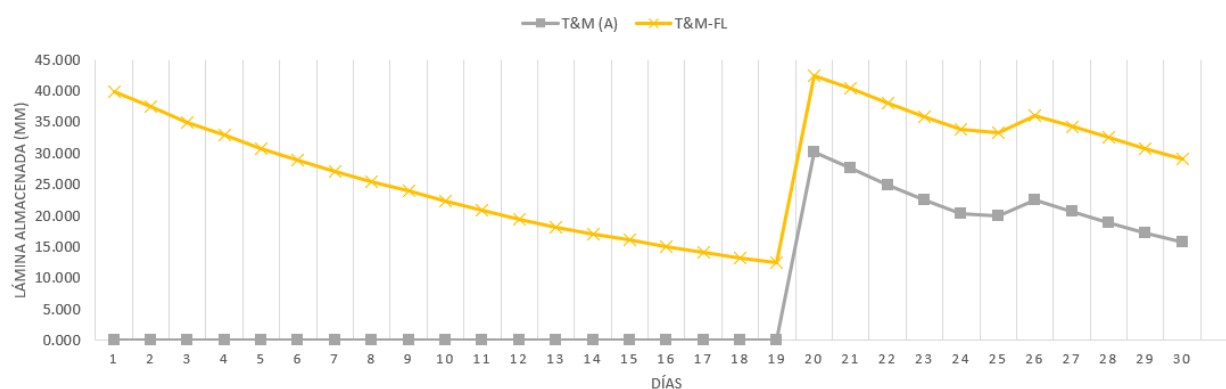


Figura 33. Lámina evaporable almacenada según modelos T&M (A) y T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

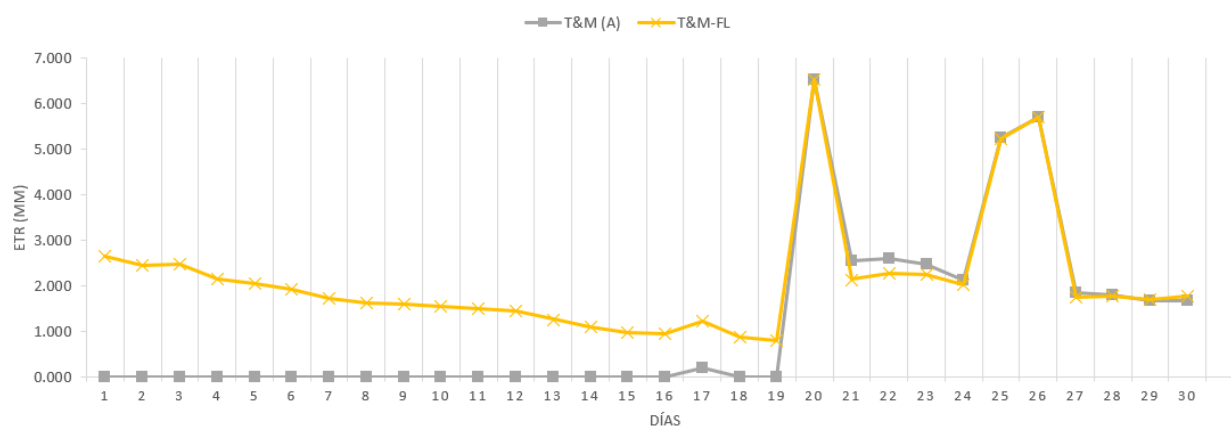


Figura 34. Evapotranspiración real según modelos T&M (A) y T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

Luego, a pesar de tener una mayor reserva hídrica evaporable, después de las primeras precipitaciones abundantes en el día 20 (Figura 22), podemos ver que la ETr que registra T&M-FL es un poco menor que la de T&M (A) en algunos días. Esto se debe a la retención que ejerce el suelo sobre la humedad; lo que puede parecer contraintuitivo; pero tiene una explicación. Si recordamos, conforme la reserva hídrica se agota y su nivel se acerca al límite de desecación, la fuerza de retención aumenta; y, en el caso de T&M-FL, ésta se vuelve más fuerte todavía, al ir por debajo del PMP; por lo que la evaporación es más difícil, en comparación a T&M (A).

Otra consideración que debemos tener es que, la humedad que se recibe por la lluvia, tardará más en abastecer el suelo según T&M-FL, comparado con su contraparte; y esta agua que se reciba no podrá pasar a ser parte del agua útil inmediatamente, lo que influye en que la tasa evaporativa no llegue a equipararse inmediatamente. La figura 35 ilustra esta situación a la perfección, donde podemos observar que T&M-FL presenta valores negativos de lámina útil durante todo el mes.

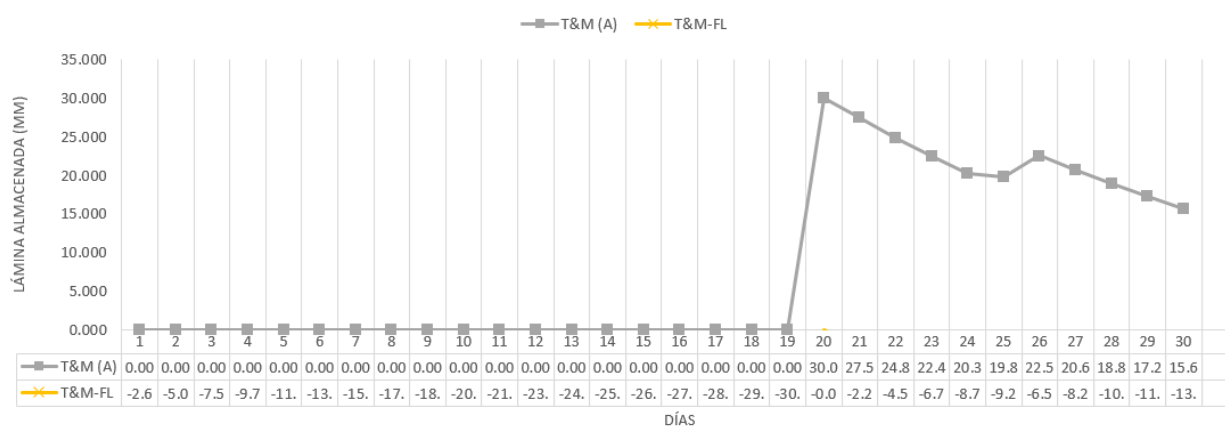


Figura 35. Lámina útil almacenada según modelos T&M (A) y T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

A pesar de lo mencionado, podemos ver que T&M (A) llega a presentar valores de ETr equiparables a los de T&M-FL en los días 24 y 27 a 30 de abril. Esto se debe a que T&M (A) está comenzando a acercarse demasiado a su límite de desecación (PMP); por lo que *la tasa evaporativa tiende a variar más abruptamente conforme la humedad se reduce entre CC y PMP que entre CC y ELD.*

- **modelo de Scho-T&M(A).** Este modelo utiliza el componente de S&L para determinar la infiltración, lo que significa que los ingresos de humedad se ven afectados por las características del terreno, por lo que son más reducidos en comparación a la precipitación bruta (Figura 22), influyendo esto en la disponibilidad hídrica. De hecho, ya previamente se había introducido a este modelo, en la

descripción correspondiente al de Schosinsky, sirviéndonos como herramienta comparativa. El motivo es justamente el uso de este componente, que permite establecer cierta igualdad de condiciones al momento de comparar el comportamiento de la lámina hídrica; lo cual no habría sido del todo posible si se utilizaba únicamente el modelo T&M (A) que, como ya vimos, tiene mayor disponibilidad de lámina al no estimar obstáculos para la infiltración.

Luego, sus otros dos componentes, el de comportamiento de lámina de T&M y el de capacidad de almacenamiento de Botey et al., ya los hemos estudiado anteriormente y tenemos una idea de la manera en que afectan a los resultados. Por ejemplo, sabemos que el componente de T&M *estima que la ET ocurre previamente a la infiltración*, lo que provoca la formación de picos evaporativos bastante abruptos en días de lluvia aislados, tal y como se observa en los días 17, 20, 25 y 26 de abril (Figura 36), equiparándose mucho al modelo T&M (A), puesto que la humedad evaporada no sufre los efectos de la retención del suelo en su mayor parte.

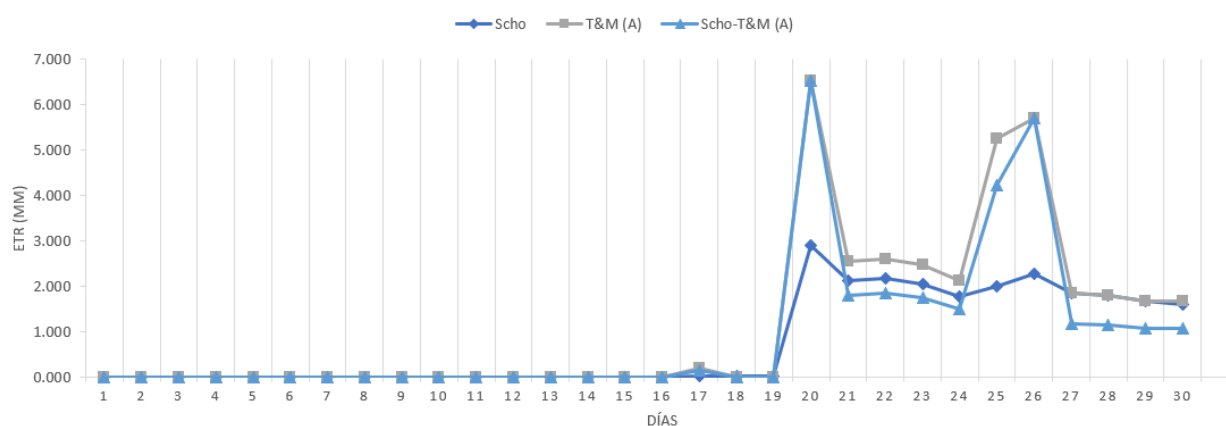


Figura 36. Evapotranspiración real según modelos Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales

También, cuando la ET resulta ser menor que la infiltración, la humedad sobrante logra incorporarse a la reserva hídrica; y si, en días subsiguientes, no ocurren más precipitaciones, la ETr será comparativamente menor, debido a la retención del suelo, como puede observarse los días 21 a 24 y 27 a 29; pero, si la ET es mayor que el aporte hídrico de la lluvia, la humedad se evaporará antes de siquiera poder formar parte de la reserva del suelo, como ocurre el 17 de abril.

Llama la atención que la ETr que estima Scho-T&M (A) no alcanza los mismos niveles que T&M (A) el día 25. Esto se explica por el hecho ya descrito anteriormente, que cuanto la ET es mayor que la PP; pero el suelo ya cuenta con una reserva hídrica previa, la atmósfera “primero” absorberá el agua precipitada y,

luego, el déficit resultante influirá en la desecación subsiguiente del suelo, cuya magnitud también dependerá del tamaño de la reserva presente, debido a la fuerza de retención. Si recordamos, la ET_p para este día era alta (Figura 32), en comparación al aporte de las precipitaciones que, por efecto del componente de S&L, se ve todavía más reducido (Figura 22). Aparte, por efecto del mismo componente S&L, la reserva hídrica es menor bajo el modelo presente (Figura 37), por lo que hay mayor retención por parte del suelo y, por lo tanto, menos evaporación.

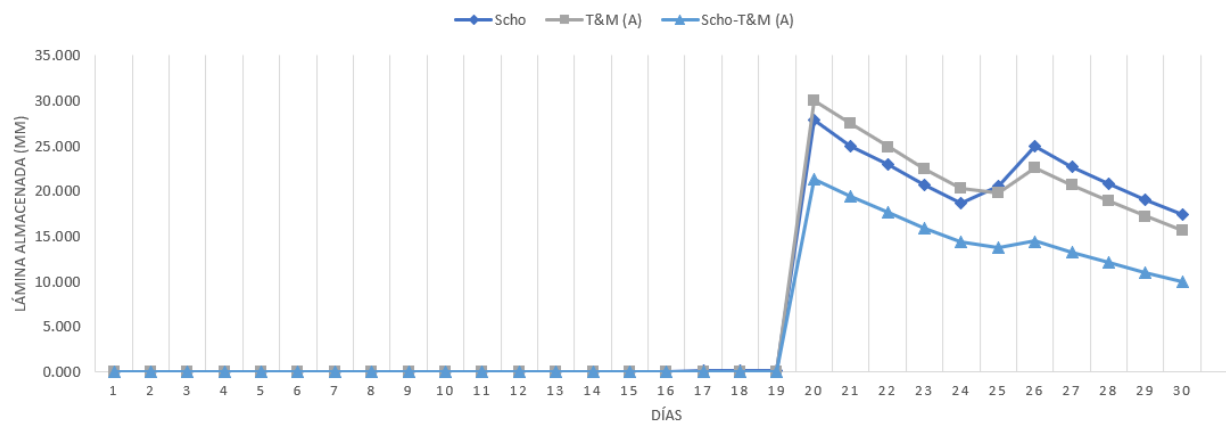


Figura 37. Lámina útil almacenada según modelos Scho, T&M (A) y Scho-T&M (A), abril 2022. Prueba en condiciones reales

También, cabe mencionar que el componente de T&M estima tasas evaporativas más elevadas que el componente de Schosinsky; característica que fue identificada en la comparación de T&M (A) con Scho; no tan evidente en la Figura X por parte de Scho-T&M (A) por el hecho de no tener suficiente humedad almacenada para mostrar una ET_r de la misma magnitud.

Finalmente, como este modelo utiliza el componente de capacidad de almacenamiento de Botey et al., la lámina evaporable varía entre la CC y el PMP.

- modelo de Scho-T&M-FL.** Este modelo, como el anterior, utiliza el componente de S&L para determinar la infiltración, por lo que los ingresos de humedad se ven afectados por las características del terreno y son más reducidos en comparación a la precipitación bruta (Figura 22). También, hace uso del componente de comportamiento de lámina de T&M, del cual conocemos bastante bien la manera en que estima la desecación en el suelo. Lo que diferencia a este modelo del anterior es el uso del componente de capacidad de almacenamiento de Forte Lay que, como hemos visto en ejemplos

anteriores, establece que la humedad disponible para evaporación fluctúa entre la CC y el ELD; lo que obliga a tener ciertas consideraciones al momento de determinar la disponibilidad hídrica.

Lo primero que puede observarse en la figura 38 es que, mientras el modelo Scho-T&M (A) empieza el mes con una reserva hídrica nula, Scho-T&M-FL sí cuenta con humedad disponible al inicio, lo que lleva a que se registre evapotranspiración por parte de este modelo (figura 39). Esto se debe a que el ELD, en este componente de almacenamiento, representa un nuevo límite de desecación, por lo que todavía la atmósfera puede seguir extrayendo humedad, alcanzando el suelo niveles de desecación por debajo del PMP.

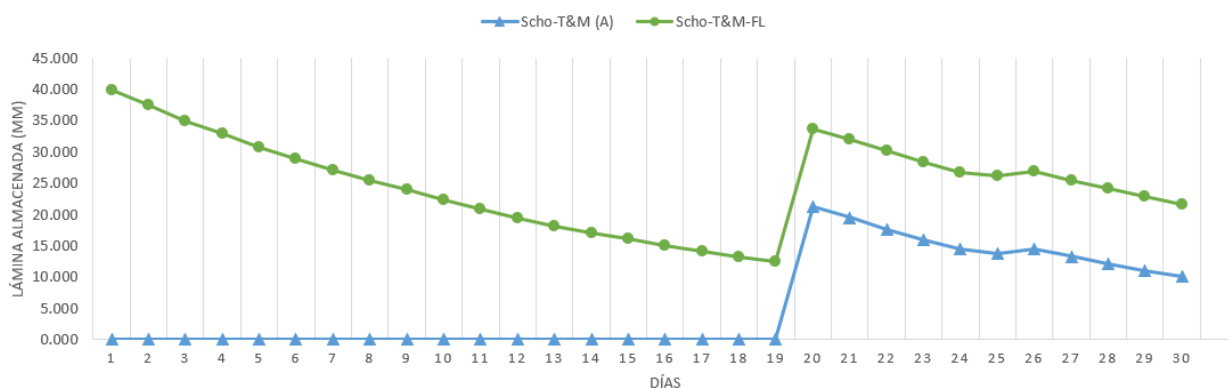


Figura 38. Lámina evaporable almacenada según modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, abril 2022.

Prueba en condiciones reales

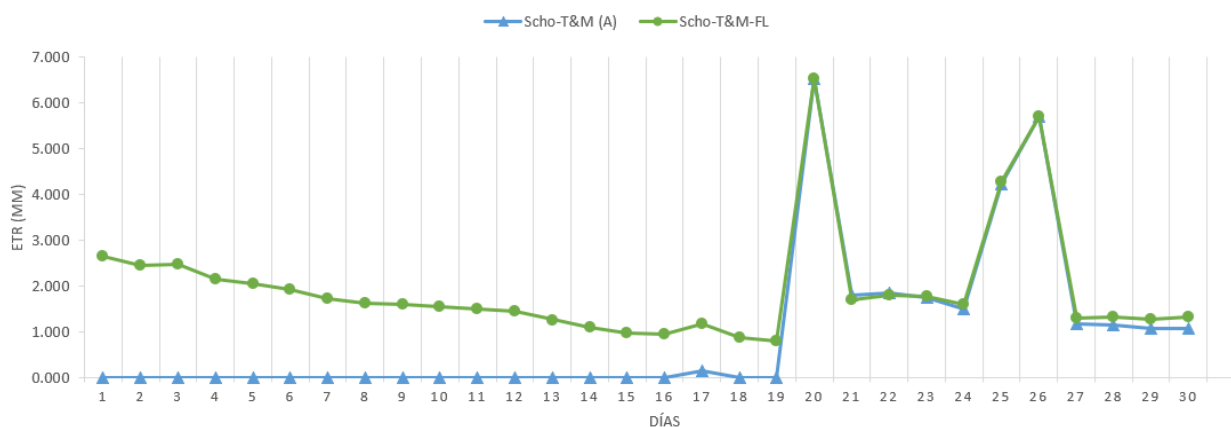


Figura 39. Evapotranspiración real según modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

Algo destacable de este caso en particular, donde comparamos a los modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, es el muy estrecho margen de variación que existe entre la ETr que estiman ambos en el período entre el 21 a 24 de abril. En los otros modelos propuestos que utilizan el componente de Forte Lay (Scho-FL y T&M-FL), se puede observar que la evaporación que estiman es menor que las de sus contrapartes que utilizan el componente de Botey et al. (Figura 28 y Figura 34); y esto, según se identificó, se debe a que, la retención que ejerce el suelo sobre la lámina húmeda es mayor, al tratarse de un nivel que va por debajo de la PMP (el día 21 de abril sí se apega a este comportamiento). Sin embargo, aquí hay otros factores influyendo en los resultados. Si recordamos, cuando se estima que la humedad varía entre la CC y el PMP, la tasa evaporativa tiende a reducirse más abruptamente y los efectos de la retención del suelo se hacen ver de manera más precoz. Aparte, el componente de infiltración de S&L limita la cantidad de agua captada por el suelo, por lo que la reserva hídrica es más limitada. Estos dos factores ponen en “desventaja” al modelo de Scho-T&M (A) al momento de estimar la ETr, haciendo que ambos modelos presenten aproximadamente los mismos valores para el período considerado; e incluso mostrando, este último, menos evaporación para los días 27 a 30 de abril.

Cabe mencionar que debemos tener en cuenta que, la humedad que se recibe por la lluvia, tardará más en abastecer el suelo según Scho-T&M-FL, comparado con su contraparte; y esta agua que se reciba no podrá pasar a ser parte del agua útil inmediatamente. En la figura 40, podemos observar que, a pesar de las precipitaciones ocurridas, Scho-T&M-FL presenta valores negativos de lámina útil durante todo el mes.

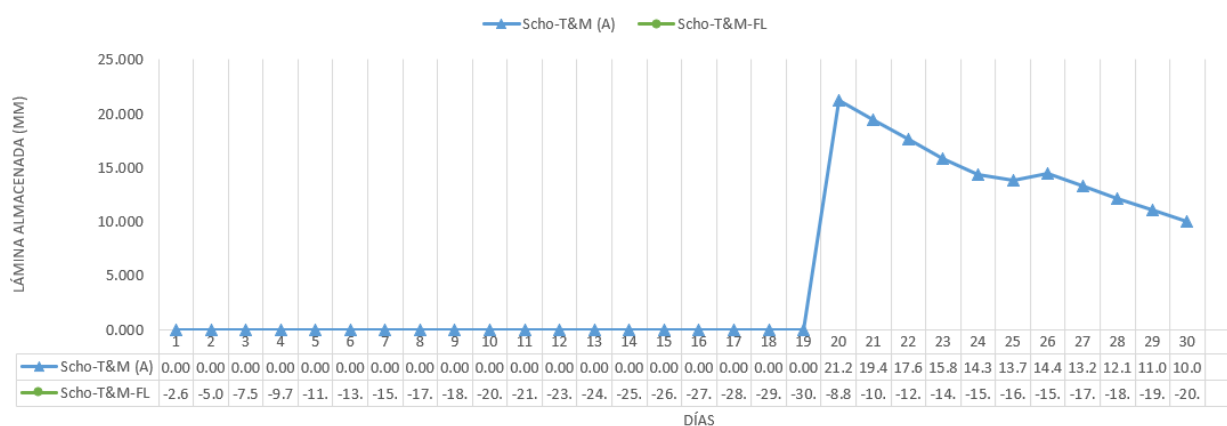


Figura 40. Lámina útil almacenada según modelos Scho-T&M (A) y Scho-T&M-FL, abril 2022. Prueba en condiciones reales

7.1.3.4. modelo seleccionado. De entre todos los modelos, los que utilizan el componente de infiltración de Thornthwaite son los menos prometedores, dado que no toman en cuenta

la influencia que tiene la fisiografía sobre la infiltración, generando una sobreestimación en los ingresos hídricos para la mayoría de casos posibles en el país, que se caracteriza por su territorio accidentado.

El componente de capacidad de almacenamiento de Forte Lay es una propuesta interesante, dado que ofrece una perspectiva más detallada de los niveles de humedad que posiblemente se alcanzarían en el suelo en condiciones severas de sequía agrícola. La idea de que la humedad pudiese agotarse por debajo del PMP nos presenta la necesidad de suplir una “demanda hídrica” existente en suelo antes de ser éste capaz de sostener vida vegetal en su medio. Sin embargo, es necesario comprobar en campo si las láminas húmedas realmente varían dentro de los umbrales que este componente propone; por lo que, con los recursos disponibles hasta el momento de la redacción de este documento, es mejor descartar los modelos que utilizan a Forte Lay en su composición; aunque no de manera definitiva, sino hasta que sea posible su verificación.

Puede argumentarse que el componente de comportamiento de lámina húmeda almacenada de Schosinsky es el que más se apega a la realidad, pues, según conocimientos empíricos, se sabe que el agua no se evapora de forma inmediata, como lo establece el componente T&M, sino que ésta ingresa al suelo de manera previa. También, según lo respaldarían algunos autores, la humedad gravitacional puede estar disponible para su consumo por las plantas y la atmósfera. Sin embargo, por estos motivos, Schosinsky suele estimar valores de almacenamiento más optimistas que T&M; y, por principio administrativo (recordando que el balance hídrico es, básicamente, un proceso contable), es mejor ser prudente con las estimaciones, tomando en cuenta todas las posibles pérdidas y considerando las situaciones de sequía más drásticas posibles, no como una medida pesimista, sino como una forma de estar preparados a actuar ante los peores casos.

Con base en las consideraciones previamente realizadas, el modelo de balance hídrico que se valora como el más adecuado para las condiciones presentes en El Salvador y que se apega a las demandas de la DOA es el modelo de *Schosinsky-Thornthwaite & Mather-AEMET*.

7.1.4. limitantes para el alcance de los objetivos de la pasantía

Debido a dificultades de disponibilidad de tiempo por parte del equipo profesional, solamente fue posible realizar el levantamiento de información de suelos en 10 de los 25 sitios planificados. Con esto, fue posible dar cobertura a toda la zona occidental del país y parte de la zona central.

Cabe enfatizar el hecho que la zona oriental quedó totalmente fuera estudio. Esta región relevante por formar parte del corredor seco centroamericano. Dicho en otras palabras, es un sector que suele verse

afectado por períodos secos prolongados. Este tipo de estudios son de gran importancia, porque la información que proveen es una herramienta sumamente necesaria para el abordaje de las problemáticas hídrica de la zona.

7.2. resultados de actividades adicionales

- **Evaluación del nivel de facilidad de comprensión de los productos elaborados de la DOA:** se solicitó al estudiante pasante calificar el nivel de facilidad de comprensión de cuatro documentos producidos por la DOA, siendo estos el Boletín Agrometeorológico Decádico, el Boletín ENOS, la Perspectiva Nacional del Clima y el Protocolo de Sequías del Centro de Clima y Agrometeorología; bajo el criterio de alguien inexperto en materia meteorológica. Éste se entregó personalmente al Gerente de Meteorología. Ver Anexo 6.
- **Ingreso de datos de lluvia diaria.**
- **Desarrollo de una presentación de proyecto y exposición preliminar de resultados:** Ver Anexo 7.
- **Vaciado de datos de libretas climatológicas de enero y agosto 2022:** Ver Anexo 9.
- **Participación en el Taller teórico-práctico de análisis agro-climatológico, usando el software “Water Requirement Satisfaction Index (WRSI)”:** Se invitó al estudiante pasante a recibir una capacitación por parte de la Asociación Fundación para la Cooperación y el Desarrollo Comunal de El Salvador (CORDES) en la utilización de herramientas GIS de análisis climatológico. Ver Anexo 9.
- **Capacitación en el uso del software CPT.**
- **Visita a parcelas de monitoreo de lluvia:** Ver Anexo 9.
- **Participación en el Taller de Observadores Meteorológicos noviembre 2023:** Ver Anexo 9.
- **Ejecución de análisis físicos de laboratorio en muestras de suelo recolectadas:** Se recolectaron los datos en tablas diseñadas para cada proceso y se llevaron a cabo los respectivos cálculos para la obtención de los valores de cada muestra analizada. Ver anexo 9.
- **Gestión de préstamo de equipo de campo para uso del MARN:** Ver Anexo 8.

8. CONCLUSIONES

Fue posible realizar el levantamiento de información en 10 de 25 de los sitios planificados, sistematizándose los resultados en un formato de descripción de suelos de fácil entendimiento. Gracias a este esfuerzo, ahora se cuenta con un esquema más detallado y accesible de las condiciones edafológicas e hídricas presentes a lo largo de la Zona Occidental y parte de la Zona Central; quedando a disposición de la UES y el MARN para la realización de estudios meteorológicos y de diversa índole que permitan trabajar en el desarrollo socioeconómico y ambiental de la región. No obstante, ha quedado fuera del estudio la Zona Oriental, que es el área con mayor vulnerabilidad hídrica en el país.

El modelo de balance hídrico de Schosinsky-Thornthwaite & Mather-AEMET se propone como el más adecuado para funcionar acorde a las necesidades metodológicas de la DOA, pues toma en cuenta numerosos factores que influyen en la tasa de restitución de humedad y agotamiento de lámina, lo que representa un aumento en la precisión de los resultados con respecto al modelo utilizado actualmente por ellos. Estos cambios previenen la obtención de falsos positivos que pudiesen poner en riesgo la situación económica de las personas que consultan los productos elaborados y que dependen de la certeza de la información que les es proporcionada.

Se finalizó con la digitalización de la información climatológica de la estación agroclimatológica “La Providencia”, quedando disponible para uso de la DOA y la Facultad de Ciencias Agronómicas. de la Universidad de El Salvador, en un formato que permitirá su consulta de forma sencilla. Con esto, ambas entidades logran subsanar un vacío de información importante, aumentando la precisión de sus estimaciones realizadas para la ejecución de sus labores y estudios futuros.

9. RECOMENDACIONES

Es recomendable dar continuidad al estudio de suelos, por su potencial de ofrecer información valiosa para la realización de estudios hídricos y de diversa índole. Fuese adecuado, sin embargo, cambiar el criterio bajo el cual se realiza la selección de sitios de estudio, utilizando un mapa de clasificación de suelos como base para ello, pues las características del suelo no varían gradualmente en el espacio de la misma manera en que lo hacen las condiciones climatológicas.

Fuese ideal expandir este estudio a las zonas central y oriental del país, que no pudieron ser cubiertas por el presente, por el motivo que es hacia el oriente donde estudios como éste tienen más importancia, por la vulnerabilidad hídrica de la región; y porque ya se dio cierto grado de cobertura al occidente del país.

Respecto al estudio hídrico, fuese adecuado estudiar más a fondo los sitios en los cuales se llevó a cabo el método del infiltrómetro de doble anillo, dado que los resultados obtenidos difieren de lo esperado por los parámetros que se utilizaron como referencia, existiendo, seguramente, factores que han influido en ello y que requieren de especial atención.

Luego, a pesar que, con el modelo propuesto en este trabajo, se logra una mejoría con respecto a los métodos utilizados previamente para la elaboración de balances hídricos, es recomendable establecer ensayos en campo que permitan validar todas las propuestas de balance hídrico realizadas. Fuese particularmente oportuno verificar la aplicabilidad del planteamiento realizado por Forte Lay con respecto a la capacidad de almacenamiento del suelo y la posibilidad de ocurrir desecación por debajo del punto de marchitez permanente, así como la validez del cálculo propuesto para la estimación de un límite de desecación.

Los valores generados por el balance hídrico deberían de acompañarse con datos de campo; por lo que fuese adecuado establecer una red de instrumentos que permitan consultar la lámina húmeda disponible, de ser posible, en tiempo real. Esto es porque un modelo jamás podrá retratar a la perfección las condiciones existentes en un ecosistema real.

También, fuese recomendable llevar a cabo un estudio que permita determinar la tasa de desecación del suelo según su profundidad, la configuración de su perfil y la composición de sus horizontes. Esto permitiría la elaboración de modelos de consumo de humedad más precisos y, a su vez, permitiría verificar la aceptabilidad del planteamiento realizado por Schosinsky y Thornthwaite & Mather que establece que, por debajo de la zona de absorción de las raíces de las plantas, el suelo siempre se mantiene a capacidad de campo.

Finalmente, fuese adecuado trabajar en mejorar el libro de cálculo para aumentar la precisión de sus resultados. Se considera primordial la elaboración de un proceso computacional que permita estimar diariamente la variación en el K_c y la profundidad de raíz de los cultivos, solventando las debilidades que presenta la estimación decadal de dichos valores.

10.BIBLIOGRAFÍA

- Aguiló Alonso, M; Albaladejo Montoso, J; Aramburu Maqua, MP; Carrasco González, RM; Castillo Sánchez, V; Ceñal González-Fierro, MA; Cifuentes Morales, M; Cifuentes Vega, P; Cristóbal López, MA; Martín Duque, JF; Escribano Bombín, R; Glaría Galcerán, G; González Alonso, S; González Barberá, G; Iglesias Pómez, J; Iglesias del Pozo, E; López de Diego, LA; Martín Llorente, F; Martínez-Mena García, M; Milara Vilches, R; Pedraza Gilsanz, J; Rastrollo Gonzalo, A; Rubio Maroto, R; Sanz Sa, JM; Sanz Santos, MA; Valero Huete, F. 2014. Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico. (documento PDF). 4 ed. Escribano Aramburu, P (ed.). Madrid, España, UPM. 935 p.
- Alley, WM. 1984. On the Treatment of Evapotranspiration, Soil Moisture Accounting, and Aquifer Recharge in Monthly Water Balance Models. (documento PDF). Water Resources Research 20(8): 1137-1149.
- Avidán, A. 1994. Factores que Influyen sobre el Régimen de Riego. (documento PDF). Determinación del Régimen de Riego de los Cultivos 1 fasc. Dan Scheuer (ed.). Jerusalén, Israel, HAIGUD. 79 p.
- Botey Fullat, R; Moreno García, JV. 2015. Metodología para estimar la Humedad del Suelo mediante un Balance Hídrico Exponencial Diario. (documento PDF). España, AEMET. 22 p.
- Botey, R; Pérez-Arias, J; Moreno, JV. 2011. Estimación del Contenido de Agua del Suelo mediante el Balance Hídrico Exponencial Diario y comparación con medidas *in situ* en un Typic Haploxeralf en la Zona Centro (Madrid – España). (documento PDF). Martínez Fernández, J, Sánchez Martín, N (eds). Estudios en la Zona No Saturada del Suelo (10, 2011, Salamanca, España). Salamanca, España, ZNS. p. 303-308
- Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 1988. Applied Hydrology. (documento PDF). Clark, BJ, Morris, J (eds.). Estados Unidos de América, McGraw-Hill. 540 p.
- Dorronsoro Fernández, CF. s.f. Museo Virtual. (en línea, sitio web). Granada, España, Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Granada. Consultado 2 may. 2023. Disponible en: <http://www.edafologia.net/museovirtual/indice.html>
- Escamilla, J. 2021. Informe Final de la Adaptación, Desarrollo e Implementación del Modelo de Agua en Suelo para el Agro. (documento PDF). San Salvador, El Salvador, MARN. 89 p.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2006. Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. (documento PDF). Roma, Italia. 322 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2009. Datos de cultivos agrícolas. (programa informático, Cropwat 8.0). Roma, Italia.
- Fernández-Long, ME; Hurtado, RH; Pérez, S; Spescha, L. 2019. Balance Hidrológico Operativo para el Agro Versión Estudiantil (BHOAe). (documento PDF). *Agronomía & Ambiente* 39(1): 33-44.
- Fernández-Long, ME; Spescha, L; Barnatán, I; Murphy, G. 2012. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). (documento PDF). *Agronomía & Ambiente* 32(1-2): 31-47.
- García, L; Zimmermann, R; Soriano, L. 2010. Cronología Breve del Servicio Meteorológico de El Salvador. (en línea, documento PDF). San Salvador, El Salvador, SNET. 5 p. Consultado 31 de julio 2024 Disponible en: <https://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00253/doc00253.htm>
- Goyal, MR; Ramírez Builes, VH. s.f. Elementos de Agroclimatología. (documento PDF). Chinchiná, Colombia, UNISARC. 307 p.
- Gutiérrez Castorena, MC. 2023. Manual para la Descripción de Perfiles de Suelos. Texcoco, México. s.e. 54 p.
- Lessman, H. 1978. Introducción a la Meteorología. Ed. corr. San Salvador, El Salvador, UES. t. 1, 200 p.
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). s.f. Marco Institucional. (en línea, sitio web). San Salvador, El Salvador. Consultado 3 may. 2023. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.sv/marco-institucional/>
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 2023. Servicios de información geoambiental tarifada. (sitio web). San Salvador, El Salvador. Consultado: 14 abr. 2025. Disponible en: <https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/servicios-de-informacion-geoambiental-tarifada/>
- PROSAP (Programa de Servicios Agrícolas Provinciales, Argentina). s.f. Medición de la Infiltración en el Suelo Mediante Infiltrómetros de Doble Anillo. (documento PDF). Buenos Aires, Argentina. 12 p.
- Rico Naves, MA. 1974. Las Nuevas Clasificaciones y los Suelos de El Salvador. San Salvador, El Salvador, UES. 104 p.

- Ruiz Álvarez, O; Arteaga Ramírez, R; Vázquez Peña, MA; Ontiveros Capurata, RE; López López, R. 2012. Balance Hídrico y Clasificación Climática del Estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 28 (1): 1-14.
- Salazar Morales, CH. 1985. Evapotranspiración Potencial en El Salvador. Tegucigalpa, Honduras, CRRH. 84 p.
- Sánchez San Román, FJ. s.f. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves. (documento PDF). Salamanca, España, USAL. 3 p.
- Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC; Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils. (documento PDF). Vers. 3.0. Lincoln, Nebraska, Estados Unidos de América, NRCS. 298 p.
- Schosinsky Nevermann, G. 2006. Cálculo de la Recarga potencial de Acuíferos Mediante un Balance Hídrico de Suelos. (documento PDF). *Revista Geológica de América Central* 34-35: 13-30.
- Schosinsky, G; Losilla, M. 1999. Modelo Analítico para Determinar la Infiltración con Base en la Lluvia Mensual. (documento PDF). *Revista Geológica de América Central* 23: 43-55.
- Silva, P; Silva, R; Garrido, M; Acevedo, E. 2015. Manual de Estudio y Ejercicios Relacionados con el Contenido de Agua en el Suelo y su Uso por los Cultivos. (documento PDF). Santiago de Chile, Chile, UCHILE. 86 p.
- Soilmoisture. 2008. 2800K1: Operating Instructions. (documento PDF). Santa Barbara, Estados Unidos de América. 55 p.
- Suárez de Castro, F. 1979. Conservación de Suelos. (documento PDF). 3 ed. De la Cruz, M (ed.). San José, Costa Rica, IICA. 339 p.
- Thornthwaite, CW. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. (documento PDF). *Geographical Review* 38(1): 55-94.
- Thornthwaite, CW; Mather, JR. 1955. The Water Balance. (documento PDF). *Publications in Climatology* 8(1): 9-104.
- Thornthwaite, CW; Mather, JR. 1957. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. (documento PDF). *Publications in Climatology* 10(3): 185-311.

Villavicencio Poblete, A. 2020. Metodología para Determinar la Velocidad de Infiltración en Suelos al Establecimiento. In Morales Alcayaga, CG (ed.). Frambueso: Consideraciones para un Exitoso Establecimiento del Cultivo. Villa Alegre, Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. P. 53-70.

White, RE. 2006. Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource. (documento PDF). 4 ed. Oxford, Reino Unido, Blackwell. 386 p.

11.ANEXOS

11.1. A-1. formato utilizado para la descripción de suelos en campo

Formato para descripción de suelos en campo

Nombre de institución				Pedón No.											
Clasificación del Suelo				Condición Meteorológica											
Descrito por:		Fecha	Latitud Longitud	Localización (municipio)						Provincia fisiográfica					
Paisaje	Forma del relieve	Micro-rasgos	Elevación	Geomorfología			Pendiente			Forma de Pendiente					
Posición del perfil en la ladera		Orientación del perfil		Vegetación						Uso y cubierta del suelo					
Drenaje	Inundación Encharcamiento	Humedad del suelo		Permeabilidad			Clima								
Material parental				Tipo						Profundidad					
Erosión	Tipo	Grado	Pedregosidad	%	Forma					Grupo (s)					
Horizontes:				Propiedades de diagnóstico:											
Notas de campo				Dibujo											
Número de Capas	Profundidad cm	Transiciones		Horizontes Genéticos	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		Forma	Limites		10										
					20										
					30										
					40										
					50										
					60										
					70										
					80										
					90										
					100										
					110										
					120										
					130										
					140										
					150										



11.2. A-2. formatos utilizados para las pruebas de infiltración

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS
 DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

Por Ing Agr. Msc. Jose Mauricio Tejada

FORMULARIO DE REGISTRO DE CAMPO PARA PRUEBAS DE INFILTRACION EMPLEANDO CILINDROS INFILTROMETRO

LUGAR:

PROYECTO:

FECHA:

RESPONSABLE:

Numero de datos	Duracion del periodo (min)	HORA	LECTURAS (cm)	
			antes	despues
1				
	1			
2				
	2			
3				
	3			
4				
	5			
5				
	7			
6				
	10			
7				
	15			
8				
	20			
9				
	25			
10				
	30			
11				
	118			

Tasa de infiltracion regimen permanente R1 (cm/min) =

--

Tasa de infiltracion regimen permanente R2 (cm/min) =

--

OBSERVACIONES: _____

Descripción del Sitio

Código de lugar:

Lugar:

Clima:

Autor:

Clasificación:

➤ Genética

➤ Taxonómica:

Coordenadas:

Fecha:

Características y Observaciones

Profundidad:

Humedad:

Pendiente:

Elevación:

Drenaje:

Material parental:

Fisiografía:

Erosión:

Pedregosidad:

Vegetación:

Uso actual:

Distribución de las raíces:

Observaciones:

Descripción Macromorfológica del Perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción

Propiedades Hídricas del Suelo

Infiltración base (cm/h)	
Conductividad Hídrica (cm/h)	

Fotos de Detalle

er7	er21	pa7	pa14	pa21			GT2_SV_7	GT2_SV_14	GT2_SV_21	GT5_SV_7	GT5_SV_14	GT5_SV_21	GT10_SV_7	GT10_SV_14	GT10_SV_21
er07	er21	pa07	pa14	pa21	pa	evap									
.	1				0					24.4	40	28.6	26.8	34.8	31.4
2	0				0					24.6	39.8	30.3	27	33.8	32
2	.				0					24.8	39.1	29.6	27.4	33.4	31.6
.	.				0					25.6	38	29.4	27.8	33.4	31.4
0	0				0					25	38.2	28.8	27.6	33.6	31.2
0	0				0					24.8	38.4	29.4	27.2	33.8	31.6
0	0				0					25.5	39.8	29.2	27.8	34.3	31.4
0	0				0					24.6	40	28.9	27.6	34.6	31.4
2	0				0					23.6	38	27.8	26.7	32.6	31.2
2	0				0					23.4	38.8	28	26.4	33.4	30.8

GT20_SV_7	GT20_SV_14	GT20_SV_21	GT50_SV_7	GT50_SV_14	GT50_SV_21	GT100_SV_7	GT100_SV_14	GT100_SV_21	GT2_V_7	GT2_V_14	GT2_V_21	GT5_V_7	GT5_V_14	GT5_V_21	GT10_V_7	GT10_V_14	GT10_V_21
29.5	30.4	31.8		30.4				29.8				23.2	31.6	26.6	25.4	29.2	28.2
29.6	30.4	32		30.4				29.8				23.8	31.4	27.8	25.8	29	28.6
30	30.4	31.6		30.4				29.8				24.2	31	27.2	26.2	28.6	28.4
30	30.4	31.6		30.5				29.9				24.6	30.4	27.2	26.2	28.6	28.4
30	30.5	31.6		30.5				29.9				24.4	30.8	27.2	26.2	28.8	28.4
29.8	30.7	31.8		30.5				29.9				24.2	31.2	27.4	26	29	28.8
30	30.7	32		30.5				29.9				24.8	32	27.4	26.6	29.8	28.8
30	30.6	31.8		30.6				29.9				24.3	32.1	27.2	26.4	29.9	28.6
29.8	30.2	31.2		30.5				29.9				23.4	30.8	27.3	25.8	29.6	28.8
29.4	30	31.2		30.4				30				23.4	31.2	27	25.8	29	28.4

GT20_V_7	GT20_V_14	GT20_V_21	GT50_V_7	GT50_V_14	GT50_V_21	GT100_V_7	GT100_V_14	GT100_V_21
27.2	27.6	28.4		28.8			29.4	
27.4	27.6	28.6		28.7			29.4	
27.8	27.8	28.6		28.7			29.3	
27.8	28	28.6		28.8			29.3	
27.7	28	28.6		29.1			29.3	
27.6	28.1	28.8		29.1			29.3	
28	28.3	29		29.1			29.3	
28	28.3	29		29.1			29.3	
27.8	28.6	28.4		29			29.3	
27.4	27.8	28.8		29			29.3	

11.5. A-5. vínculo de acceso a manual de usuario de libro de cálculo de balances hídricos

Doble clic a la portada para acceder al manual de usuario.



11.6. A-6. nivel de facilidad de comprensión de productos elaborados de la DOA

Informe sobre Nivel de Facilidad de Comprensión de Boletines producidos por la Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales

Se calificará la facilidad de comprensión de los boletines producidos por la DOA con base en una escala de 0 a 10, donde 0 significa absolutamente incomprensible y 10 completamente comprensible.

Boletín Agrometeorológico #9, 21 al 31 de marzo de 2023

Este boletín tiene un nivel de facilidad de comprensión de 7. El apartado menos comprensible es el número 3, “Velocidad y dirección de los vientos estimada y registrada”, dado que presenta datos que no tienen significado aparente sin un parámetro con el cual compararlos. Como recomendación para su mejoría, se podría añadir parámetros que permitan determinar el significado de cada variable presentada, mejorar las representaciones gráficas y reducir la cantidad de tecnicismos en la redacción.

Boletín Fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), febrero 2023

Este boletín tiene un nivel de facilidad de comprensión de 5. El problema principalmente está en la conceptualización de los fenómenos expuestos, dado que no se ofrecen definiciones completas que permitan la comprensión para alguien ajeno o nuevo a la materia climatológica. También son perceptibles algunos errores de redacción que dificultan seguir la secuencia de los sucesos. Para su mejoría, podría expandirse el glosario y redactar un documento que permita una adecuada conceptualización con representaciones gráficas de los fenómenos.

Perspectiva Nacional del Clima: mayo-agosto 2023

Este documento tiene un nivel de facilidad de comprensión de 8. La sección menos comprensible es la de los “Forzantes Climáticos”, dado que requiere conocimiento previo de estos fenómenos y su desarrollo, aparte que no se hace una conexión clara entre su ocurrencia y su efecto en las condiciones meteorológicas previstas para el trimestre. Es recomendable incluir un amplio glosario en el documento que permita comprender la terminología climática utilizada.

Protocolo de Actuación por Sequía Meteorológica en la Estación Lluviosa

Este documento tiene un nivel de facilidad de comprensión de 9. La secuencia de la información es comprensible, salvo por ciertos tecnicismos que no son explicados en el glosario. Fuese recomendable expandir dicho glosario o redactar un documento explicativo que permita profundizar en los conceptos más complejos.

11.7. A-7. proyecto interinstitucional MARN-UES (establecimiento de una red interinstitucional de monitoreo de amenazas hidrometeorológicas para la agricultura de granos básicos)

¿Qué se va a hacer?

Establecer un sistema de monitoreo de amenazas hidrometeorológicas a través de un conjunto de parcelas agrícolas demostrativas que generen información pluvial, edáfica y fenológica para el conocimiento de la oferta hídrica del suelo en servicio de la agricultura de granos básicos y la alerta temprana de sequía agrícola.

¿Cómo se va a hacer?

Se realizará una determinación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en las distintas localidades a visitar, a través del estudio del perfil in situ, la toma de muestras y la realización de los análisis de laboratorio respectivos.

Se diseñará un balance hídrico que tome en cuenta las características hídricas del suelo (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, agua útil, infiltración base), se hará una comparación de éste con otros modelos de balance y con datos obtenidos con sensores de humedad edáfica para determinar cuál de estos modelos se acerca más a la realidad.

Con el balance hídrico seleccionado, se determinarán el estado fisiológico y las necesidades hídricas de los cultivos según la información generada en cada sitio de estudio.

¿Dónde se va a hacer?

Se seleccionarán 25 parcelas agrícolas distribuidas en todo el territorio del país, dentro de un radio de 15 km de distancia de las 25 estaciones climatológicas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Hasta la fecha, se han muestreado 10 sitios.

¿Para qué se va a hacer?

Generar las condiciones que permitan promover el uso de los servicios climáticos para la orientación de los productores de granos básicos hacia una agricultura de conservación como medida de adaptación de los medios de subsistencia rurales al cambio climático y la mitigación de sus efectos; el establecimiento

de mecanismos de coordinación y cooperación interinstitucional para la caracterización de sitios edáficos de interés para lograr establecer un monitoreo más amplio y preciso de la humedad del suelo y las amenazas hidrometeorológicas, para el pleno aprovechamiento de las instituciones participantes acorde a su gestión; y sentar la base para la elaboración de un protocolo de sequía agrícola.

¿Quiénes lo harán?

El MARN gestionará la selección de sitios y coordinará con un conjunto de productores propietarios de parcelas de granos básicos distribuidos en todo el país. En compañía de un equipo de profesionales del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, se llevará a cabo el levantamiento de datos en campo y la toma de muestras de suelo para ser analizadas en laboratorio. El desarrollo de un nuevo modelo de balance hídrico, así como el acompañamiento y colaboración en las actividades de campo y laboratorio será realizado por un estudiante egresado de la carrera de ingeniería agronómica de la UES como parte de las actividades de una pasantía profesional de grado.



GOBIERNO DE
EL SALVADOR

MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
CENTRO AMÉRICA

ESTABLECIMIENTO DE UNA RED
INTERINSTITUCIONAL DE MONITOREO DE
AMENAZAS HIDROMETEOROLÓGICAS PARA
LA AGRICULTURA DE GRANOS BÁSICOS

11.8. A-8. carta de solicitud de préstamo de equipo de campo

21 de febrero de 2024

Ing. Agr. MAECE. Nelson Granados
Decano de la Facultad de Ciencias Agronómicas
Saludos

Deseándoles éxito en sus proyectos personales y académicos.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador cumple su mandato como rector de la gestión ambiental nacional y es una institución cohesionada y respetada que promueve una vigorosa cultura ciudadana para recuperar el medio ambiente y reducir los riesgos socioambientales.

Una de nuestras líneas estratégicas es la investigación científica y el apoyo a la docencia a través de la apertura de pasantías de práctica profesional con La Facultad de Ciencias Agronómicas; con la cual se está desarrollando un estudio de campo para la caracterización de suelos a través de la descripción geomorfológica de los suelos y pruebas de infiltración *in situ*.

El motivo de la presente es solicitar el préstamo de un **infiltrómetro de doble anillo**, durante los meses de Marzo a Abril de 2024, para continuar con el levantamiento de información de campo y llevar a cumplimiento los objetivos y compromisos establecidos en el plan de pasantía del estudiante **Diego Alessandro Sosa Escobar (Carnet: SE16005)**, con quien, inicialmente y en compañía de los colegas profesionales del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, se estuvo llevando a cabo dicha labor pero por motivos extraordinarios dicho acompañamiento no ha sido superado; sin embargo, debido a la falta de disponibilidad de tiempo por parte de los compañeros, no ha sido posible dar seguimiento hasta la fecha.

Me remito a la "Carta de Entendimiento del año 1999" para evocar los compromisos de colaboración existentes entre nuestras instituciones, MARN – UES.

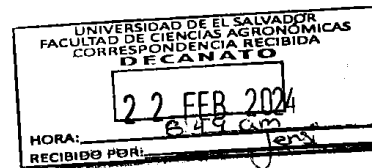
Esperando una respuesta afirmativa a la presente, me suscribo.

Atentamente


Antonio Medina Lima



amedina@ambiente.gob.sv



11.9. A-9. fotografías de actividades adicionales a la pasantía



Vaciado de libretas climatológicas asignadas, MARN, San Salvador, agosto 2023



Participación en el taller teórico-práctico de análisis agro-climatológico, PMA, San Salvador, septiembre 2023



Instrucción en el uso de equipo pluviométrico, Chalchuapa, septiembre 2023



Participación en el taller de observadores meteorológicos, MARN, San Salvador, noviembre 2023



Preparación de muestras de suelo para la aplicación de pruebas de laboratorio, Universidad de El Salvador, San Salvador, diciembre 2023